



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

# **ESTUDI COMPARATIU DELS DIFERENTS REFRIGERANTS EMPRATS EN ELS SISTEMES DE CLIMATITZACIÓ DE VEHICLES ELÈCTRICS**

Titulació: **Grau en Enginyeria Mecànica**

Alumne: **Pau Mir Durbán**

Director del PFC: **Oscar Ribé**

Convocatòria de lliurament: **Octubre 2017**

## 1. INDEX

1. INDEX .....	2
2. MOTIVACIÓ .....	5
3. ABAST.....	6
4. ESTAT DE L'ART .....	7
4.1. Història de la climatització als vehicles .....	7
4.2. Història dels fluids refrigerants.....	8
4.2.1. Problemàtica mediambiental.....	10
4.3. Com funciona l'aire condicionat d'un vehicle.....	11
4.4. Sistemes de calefacció del vehicle .....	16
4.5. Mòdul climatitzador.....	19
5. REFRIGERANTS.....	24
5.1. R1234yf .....	24
5.2. CO <sub>2</sub> .....	25
6. COMPARATIVA DELS REFRIGERANTS.....	26
6.1. R134a vs R1234yf .....	26
6.2. CO <sub>2</sub> (R744) vs R134a .....	30
6.2.1. Conclusions estudi comparatiu R744 i R134a.....	40
7. CARREGUES TÈRMiques D'UN VEHICLE .....	41
7.1. Càrrega metabòlica .....	44
7.2. Càrrega per radiació .....	44
7.3. Càrrega ambient.....	46
7.4. Càrrega de ventilació .....	47
7.5. Càrregues del sistema d'escapament de gasos i motor .....	48
7.6. Càrregues del sistema de climatització.....	48
8. ELEMENTS PRINCIPALS D'UNA INSTAL·LACIÓ .....	50
8.1. Evaporador .....	50
8.2. Ventiladors .....	51
8.3. Compressor .....	52
8.4. Condensador .....	52

8.5.	Vàlvula d'expansió.....	54
9.	CÀLCULS.....	57
9.1.	Dades i hipòtesis .....	57
9.2.	Càlcul de càrregues.....	62
9.2.1.	Càrregues per radiació .....	64
9.2.2.	Càrrega metabòlica .....	66
9.2.3.	Càrrega ambient.....	66
9.2.4.	Càrrega de ventilació .....	67
9.3.	Càlcul total càrrega refrigeració .....	67
9.4.	Càrregues de calefacció .....	67
9.4.1.	Càrrega de ventilació .....	68
9.4.2.	Càrrega tancaments .....	69
9.5.	Comparativa càrrega refrigeració i calefacció .....	70
10.	DIMENSIONAMENT DE L'EQUIP.....	72
10.1.	Sistema amb R1234yf .....	73
10.2.	Sistema amb CO <sub>2</sub> .....	76
11.	PRESUPOST .....	79
12.	CONCLUSIONS.....	80
	ANNEXOS.....	82
	Abreviatures i símbols .....	82
	Normativa.....	85
	Normativa sobre l'esgotament de la capa d'ozó causat pels refrigerants .....	85
	Normativa sobre l'efecte hivernacle causat pels refrigerants.....	86
	Refrigerants.....	88
	Propietats termodinàmiques dels refrigerants .....	88
	Classificació dels refrigerants .....	90
	Nomenclatura .....	91
	R134a.....	92
	CO <sub>2</sub> .....	93
	Materials a la cabina del vehicle i les seves propietats tèrmiques .....	96
	Factors a considerar en una nova instal·lació.....	99
	Qualitat de l'aire i confort tèrmic.....	99
	Consum energètic.....	100
	Durabilitat i paràmetres físics .....	101



Soroll i vibracions.....	101
Disseny frontal del vehicle .....	102
Components del subsistema de control de l'aire .....	102
BIBLIOGRAFIA.....	104
Taules .....	106

## 2. MOTIVACIÓ

Des de sempre he tingut un gran interès i he sentit molta atracció per les novetats tecnològiques que anaven sorgint dia a dia. És per això que em vaig decidir a estudiar una enginyeria. Actualment s'està parlant molt i he llegit bastant sobre els vehicles elèctrics, els quals exponencialment estan aconseguint un lloc al mercat i han passat de ser un ideal futur a una realitat present. Tot plegat m'ha fet sorgir un gran interès en el tema, afegint, a més, que durant la meva participació en el programa Erasmus he tingut la sort d'estar a una universitat on l'enginyeria mecànica estava molt enfocada en l'automoció i alguns professors explicaven amb molta passió la importància actual i futura d'aquest tipus de vehicle, això va provocar que el meu interès en el tema encara fos més fort.

### 3. ABAST

En qualsevol vehicle el consum d'energia del sistema de climatització té un impacte en el consum energètic total del vehicle, tant en els vehicles de combustió on el compressor requereix de l'energia del motor d'explosió com en els vehicles elèctrics, on l'impacte d'aquest consum energètic és molt més perceptible, ja que l'energia necessària s'absorbeix directament de les bateries disminuint així l'autonomia del vehicle. L'autonomia és un dels aspectes més importants d'aquest tipus de vehicle i s'ha de tenir molta cura d'aconseguir que sigui el més elevada possible, una de les formes és coneixent les càrregues tèrmiques que hi actuen i com afecten en els rendiments de la climatització.

És per això que aquest projecte pretén fer un estudi de les diferents alternatives de sistemes de climatització d'un vehicle elèctric tenint en compte que segueixen un procés termodinàmic de compressió de vapor i analitzant els diferents refrigerants disponibles per dur a terme aquest procés. També s'analitzarà el consum energètic d'aquests, sempre considerant i tenint molt present el confort dels passatgers, el qual està molt vinculat al sistema de climatització.

En el present estudi s'analitzaran els refrigerants més habituals actualment i nous que es comencen a implantar al mercat i que s'ajusten a les normatives vigents. En l'anàlisi no només es tindrà en compte la despesa energètica total de la instal·lació de la bomba de calor sinó que també s'estudiarà l'impacte mediambiental de cadascun dels sistemes perquè és un aspecte important a considerar.

## 4. ESTAT DE L'ART

### 4.1. Historia de la climatització als vehicles

Un dels principals elements de confort dels vehicles actuals és el sistema de climatització existent a la majoria d'ells. No només és útil per al confort dels passatgers sinó que també és molt important en el que a seguretat viària respecta ja que la climatització ajuda a evitar la fatiga i les distraccions gràcies a l'ambient ideal que aconseguix a l'interior de la cabina així com alguns elements i funcions específics inclosos a la climatització que permeten, per exemple, evitar que s'entelin els vidres.

Amb l'aparició dels primers vehicles completament tancats a inicis del segle XX els fabricants es van adonar que necessitaven oferir unes condicions de temperatura adequades a l'interior del vehicle. Inicialment i de forma bastant rudimentària es va optar per utilitzar cremadors i làmpades de gas però no era una solució efectiva. A mitjans de la segona dècada del segle XX van optar per aprofitar el calor que desprenien les canonades per on circulaven els gasos provinents del motor de combustió tot i que el calor aconseguit amb aquesta solució era bastant dèbil. El 1929 Ford va fer obsolet aquest sistema introduint una alternativa que introduïa aire calent provinent del motor a l'interior de la cabina.

El 1930 General Motors va dissenyar el sistema de calefacció estàndard que ha estat utilitzat gairebé de la mateixa forma fins a l'actualitat. Es tracta d'un radiador al qual arriba refrigerant calent des del motor i a continuació impulsa aire a través d'aquest radiador mitjançant uns ventiladors.

El 1937 Nash Motors va perfeccionar el disseny de GM afegint filtres al circuit i alguns controls perquè els conductors tinguessin l'opció de regular el flux d'aire calent que arribava al cotxe.

Alhora va sorgir un altre problema, l'acumulació de calor dins del vehicle durant els mesos més calorosos de l'any. La ventilació era la solució parcial a aquest problema però no definitiva, per tant els fabricants van haver de buscar alternatives per millorar el confort limitat aconseguit amb la ventilació.

El 1939 la Packard Motor Car Company, que era un fabricant de vehicles de luxe de l'època, va muntar el primer condicionador d'aire en un prototip. No obstant això, fins al 1953, després d'uns quants intents per part de Packard al 1940 i Cadillac al 1941, Chrysler Corporation va aconseguir instal·lar aire condicionat en un model fabricat en sèrie, en concret el Chrysler Imperial. Aquest èxit va ser a causa de l'adaptació de l'aire condicionat de l'edifici Chrysler reduint la seva mida i modificant els components però mantenint el principi de refrigeració, va ser nomenat Chrysler Airtemp.

A partir d'aquell moment alguns models van incloure tant aire condicionat com calefacció al vehicle, com per exemple els cotxes del fabricant Nash Motors després de la unió amb l'empresa Kelvinator que era un fabricant de sistemes de refrigeració.

Paral·lelament a la dècada dels 50 el sistema de calefacció es va estandarditzar per a la majoria de fabricants aconseguint així una reducció de costos i la implantació de calefacció a un gran percentatge dels vehicles venuts.

Com a conseqüència del fet que els fabricants americans estiguessin al capdavant respecte a la implantació d'aires condicionat als cotxes la presència d'aquests sistemes va créixer exponencialment a aquell mercat. S'estima que aproximadament el 20% dels vehicles venuts el 1960 portaven aire condicionat, augmentant aquest percentatge a les zones més càlides del país. 9 anys després, el 1969 el 54% dels cotxes americans ho portaven. Per un altra banda els fabricants europeus van trigar bastant més a normalitzar la utilització d'aquests dispositius d'AC en els seus vehicles.

## 4.2. Historia dels fluids refrigerants

Un cicle termodinàmic és un procés termodinàmic que al finalitzar aquest procés torna a l'estat inicial. Aquest cicle es pot aprofitar per transportar calor d'un lloc a un altre aportant treball, en aquest cas s'anomenaria cicle termodinàmic invers. Generalment s'utilitzen aquest cicles inversos en l'àmbit de la refrigeració per extreure calor d'una font freda i portar-la a una zona més calenta o extreure calor d'una font freda per portar-la a una font calenta mitjançant un cicle anomenat cicle de compressió de vapor. Per aconseguir que es compleixi aquest cicle a més de necessitar treball, que s'aconsegueix a partir d'un compressor, cal un fluid que sigui capaç de canviar el seu estat físic a partir de les condicions que es donen dins d'aquest cicle. Gràcies a aquests canvis d'estat s'aconsegueix transportar el calor d'un punt a un altre. Aquest fluid que s'utilitza com a transport d'aquesta forma d'energia s'anomena refrigerant.

Els refrigerants són fluids utilitzats en la transmissió de calor dins d'un sistema tèrmic. Es caracteritza per absorbir calor a baixes temperatures i pressions i cedir aquesta calor a temperatures i pressions més elevades. Per a ser capaços de dur a terme aquests processos es produeixen canvis d'estat del fluid.

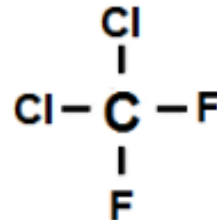
Algunes característiques molt importants a tenir en compte a l'hora de dissenyar un refrigerant són per exemple que tinguin un alt calor latent de vaporització (kJ/kg) ja que permetrà que el caudal màssic de refrigerant que circuli sigui menor, un baix volum específic ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) en estat gasos per aconseguir reduir la mida del compressor i les toveres.

S'han utilitzat una gran quantitat de refrigerants diferents des de l'aparició dels equips frigorífics, però molts d'ells es van deixar en desús o es van eliminar al desenvolupar altres amb certs avantatges i característiques que els fan més útils. També s'han creat nous refrigerants a partir de l'aparició de normatives que han prohibit la utilització de



certs refrigerants degut als seus efectes negatius com podrien ser la seva toxicitat, inflamabilitat, que fossin corrosius o que produïssin destrucció de la capa d'ozó. Els més populars i utilitzats des dels inicis van ser els freons i l'amoníac.

El 1928 C.F. Kettering, vicepresident d'una companyia d'automòbils, va decidir que necessitaven un refrigerant nou que tingués les característiques necessàries per a ser utilitzat en equips compactes dins d'un vehicle i que fos segur, estable, que no fos tòxic ni corrosiu ni inflamable. Per tant va encomanar a Thomas Midgely que desenvolupés aquest nou refrigerant. L'equip de Thomas va començar a experimentar amb alguns compostos químics comuns de carboni, clor i hidrogen afegint-hi fluor ja que sabien que aquestes combinacions eren força estables. Després de reordenar molecularment alguns compostos van aconseguir sintetitzar diclorodifluormetà (fig 1.), també conegut com R-12. Aquest fluid no era inflamable i a més tenia una toxicitat molt baixa.



[29] Fig 1. Estructura molecular

El 1929 es va desenvolupar un procés comercial pràctic per a la fabricació d'aquest nou refrigerant per part d'una companyia química. Gràcies a això va néixer la indústria dels refrigerants halogenats. El primer fabricat va ser el freó 12, que va ser el més popular. Altres fabricants posteriorment van ser el freó 11, el freó 21, el freó 114 i el freó 22. Cadascun d'ells té unes característiques diferents i per tant es poden adaptar més o menys a situacions concretes.

A la dècada dels 70 es sospitava que aquests compostos afectaven a la capa d'ozó però no es podia demostrar. Als vuitanta gràcies a uns estudis científics realitzats per la NASA mitjançant satèl·lits van descobrir una reducció del gruix de la capa d'ozó a l'Antàrtida i en estudis posteriors van descobrir que era degut a l'emissió de compostos halogenats.

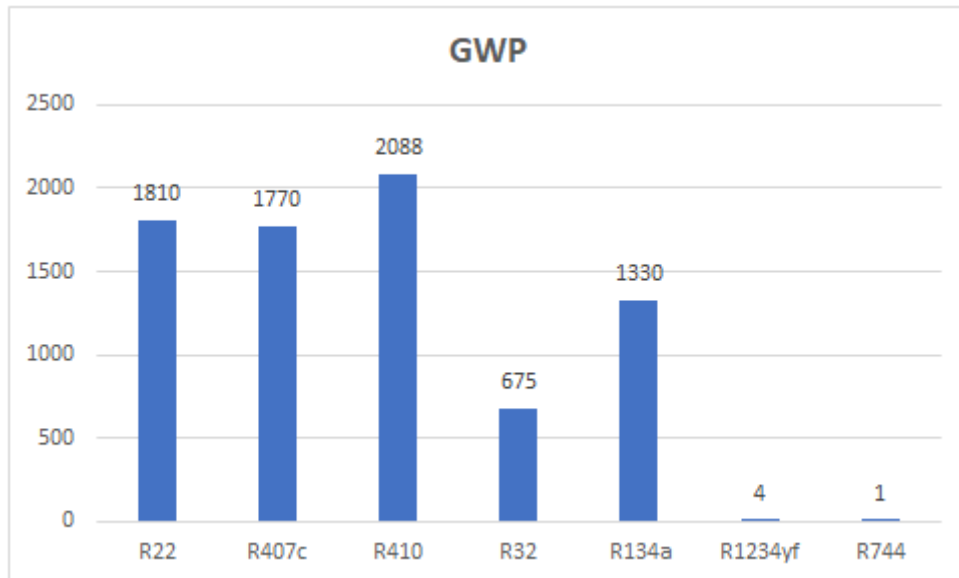
El 1987 a la ciutat de Montreal, al Canadà, es va dur a terme un acord internacional conegut com el Protocol de Montreal. Aquest protocol estava coordinat per la UNEP (programa ambiental de les Nacions Unides). Consistia en regular la producció i l'ús dels CFC de manera gradual fins al fi de la seva producció l'any 2000.

Com a conseqüència d'aquest protocol els fabricants van desenvolupar substituïts que no afectessin a la capa d'ozó per els refrigerants més importants del moment, que eren el R-11 i el R-12. Els refrigerants obtinguts finalment van ser el R-123 i el R-134a, els quals podien ser utilitzats inclús a equips que anteriorment utilitzaven R-11 o R-12 havent només de modificar el compressor i afegir olis sintètics.

Durant el període de transició des de la creació del Protocol de Montreal fins a la fi de la fabricació dels CFC es van utilitzar mesclures ternàries, les quals són mesclures azeotròpiques de tres refrigerants diferents. Principalment de R22, R124, R125, R134a i R152a. Aquestes mesclures permetien reduir l'impacte ambiental però tenir unes característiques similars.

L'11 de desembre de l'any 1997 els països industrialitzats es van reunir a Kyoto per tractar i buscar solucions respecte el tema de l'escalfament global associat a l'emissió

de gasos d'efecte hivernacle. Com a conseqüència la comissió europea va desenvolupar una normativa anomenada **Directiva europea 2006/40/CE** la qual establia la prohibició gradual de la utilització de refrigerants als vehicles amb un índex GWP superior a 150. La majoria dels refrigerants habituals superen notablement aquest índex, com podem veure a la figura 2. Com a conseqüència els fabricants de refrigerants van haver de desenvolupar altres refrigerants. Actualment el resultat obtingut per a substituir aquests gasos és el R1234yf amb un índex GWP de 4 i el R744 amb un índex d'1.



[Elaboració pròpia] Fig 2. Comparativa GWP de diferents

#### 4.2.1. Problemàtica mediambiental

S'ha comprovat que la capa d'ozó de l'atmosfera actua com a d'escut davant la radiació ultraviolada procedent del sol. També està comprovada que s'ha produït una reducció progressiva de la concentració d'ozó, especialment en algunes zones, motivada principalment per la utilització de clorofluorocarburs (CFC) presents sobretot a aerosols i refrigerants. El clor present als CFC actua com a catalitzador de la reacció química que destrueix l'ozó. Sota l'acció de l'energia solar genera la transformació de dues molècules d'ozó en tres d'oxigen i això dona lloc a una reacció en cadena. Els diferents compostos CFC tenen vinculat un índex ODP (potencial d'esgotament de l'ozó) en relació a com de perjudicials són. El valor d'ODP 1, que s'usa com a referència pertany al R-11.

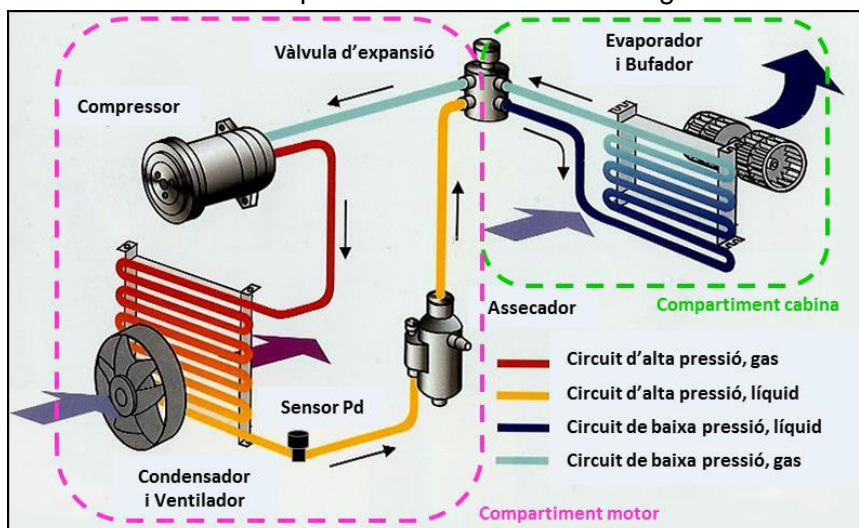
Com a conseqüència dels enormes i perjudicials efectes sobre la capa d'ozó es van prohibir al protocol de Kyoto aquests compostos i van ser substituïts per HFC que tenen un índex ODP igual a 0. No obstant posteriorment es va demostrar que aquests gasos segueixen tenint un efecte molt perjudicial per al medi ambient ja que col·laboraven i molt en l'efecte hivernacle. Tant important era aquesta aportació a l'efecte hivernacle del planeta que alguns refrigerants eren 2000 cops més "eficaços" en generar aquest efecte que el CO<sub>2</sub>.

Per tal de mesurar quin és el potencial que tenen aquests gasos en la creació de l'efecte hivernacle existeix un índex de potencial d'escalfament global també anomenat GWP. Es pren com a referència el potencial del  $\text{CO}_2$  que és 1.

### 4.3. Com funciona l'aire condicionat d'un vehicle

El funcionament de l'aire condicionat d'un vehicle és bastant similar a un aire condicionat domèstic. La idea principal és transferir el calor de la zona que volem refredar, en el nostre cas l'interior del vehicle, cap a l'exterior. Per extreure aquesta calor s'utilitza el cicle de refrigeració per compressió de vapor. Aquest cicle es basa en la propietat dels líquids d'absorbir grans quantitats de calor a mesura que es produeix la vaporització d'aquests mateixos. El principal avantatge del cicle de compressió de vapor és que el procés de vaporització d'un refrigerant és fàcilment controlable, és a dir, l'efecte refrigerant del nostre líquid es pot iniciar i aturar a voluntat i la temperatura de vaporització és fàcilment regulable si es controla la pressió a la qual el líquid es vaporitza. A més es pot aconseguir un cicle continu de subministrament del líquid refrigerant a tots els elements del circuit fàcilment.

Els components principals d'un equip de refrigeració per compressió de vapor són un compressor, el qual en cotxes de combustió s'instal·la al bloc motor i és conduït pel motor el qual subministra la potència necessària i en els cotxes elèctrics és accionat per l'energia elèctrica subministrada per la bateria. Un condensador que generalment està muntat al compartiment motor del vehicle i es situa al davant del radiador. Per últim hi ha la unitat A/C que es compon per un evaporador, una vàlvula d'expansió i un deshidratador o assecador que també fa de filtre alhora que de dipòsit del refrigerant. Podem observar la disposició dels elements a la figura 3.



[28] Fig. 3. Disposició d'un circuit de refrigeració

Abans d'explicar en que consisteix el cicle de compressió de vapor que té lloc al sistema d'aire condicionat del vehicle s'introduirà breument una descripció dels elements físics que componen aquest sistema.

El **compressor** és un element que té com a funció principal augmentar la pressió de l'agent frigorífic i conseqüentment la seva temperatura. Aquesta compressió és mecànica i en els vehicles elèctrics s'acciona per un motor elèctric. A més en el compressor s'utilitza un oli especial per a màquines frigorífiques el qual aproximadament la meitat lubrica el compressor i l'altre meitat circula amb el refrigerant lubricant el circuit. Per tal d'evitar danys al compressor és molt important assegurar-se que absorbeix el refrigerant només en estat gasós.

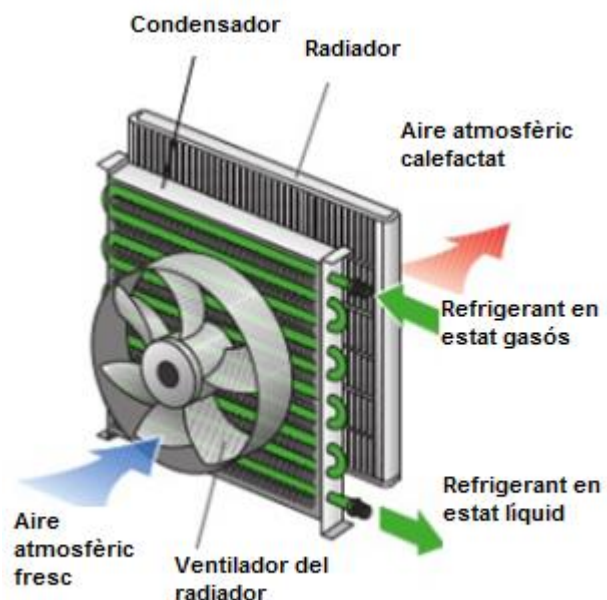
Els compressors més comuns són de tipus rotatius i de configuració axial ja que permeten un muntatge horitzontal i amb moltes possibilitats d'orientacions. Permet la lubricació per diferència de pressió i té un bon rendiment a qualsevol règim de revolucions.

El moviment de l'eix d'impulsió és rotatiu i es transforma gracies a un disc oscil·lant en un moviment axial el qual és la carrera dels èmbols que el componen. Aquests èmbols tenen una vàlvula aspirant o impulsant assignada i s'obren i tanquen automàticament segons el ritme de treball.

En els cotxes de motor d'explosió el règim del compressor va vinculat al règim de gir del motor (rpm) mentre que en els elèctrics va vinculat al motor elèctric que l'acciona i es té molta més cura del seu rendiment i consum energètic. Aquest règim del compressor influeix en la quantitat d'agent refrigerant que arriba a l'evaporador i per tant en el rendiment frigorífic del climatitzador.

El **condensador** (figura 4) és el component on es produeix el canvi d'estat del refrigerant de gas a líquid. Habitualment es compon de dos tancs laterals, tubs horitzontals amb aletes soldades a aquests en disposició vertical per tal d'aconseguir una major superfície de refrigeració. Els condensadors solen ser d'alumini i consten de 4 o 5 passos, cada pas té un nombre inferior de tubs per tal d'incrementar la densitat del refrigerant alhora que es redueix la proporció de gas. És molt important que abandoni el condensador en estat líquid.

L'energia que cedeix el fluid al passar pel condensador s'allibera a l'ambient impulsada per un ventilador o per el flux d'aire que el travessa degut a la velocitat del vehicle.



[32] Fig. 4. Dibuix d'un condensador

L'**evaporador** és un intercanviador de calor que transfereix la calor de l'aire cap al fluid refrigerant gràcies a l'evaporació d'aquest. Igual que el condensador és d'alumini i està format per aletes soldades a un conjunt de tubs que el creuen de dalt a baix.

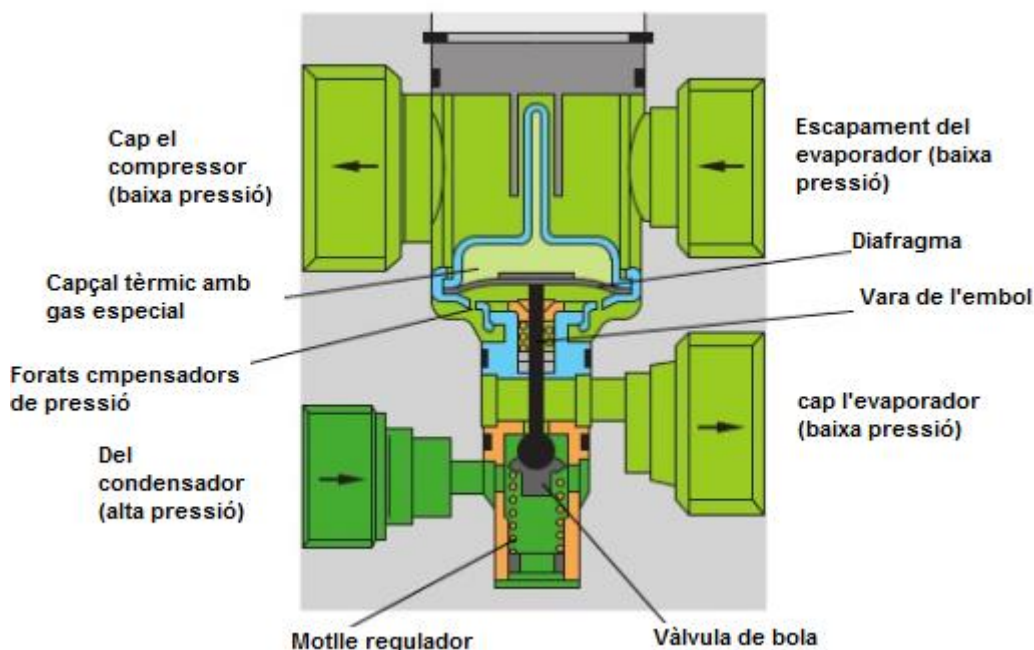
Quan l'aire travessa aquest component cedeix la calor que porta a les aletes i tubs els quals aprofiten aquesta calor per a evaporar el fluid que hi ha al seu interior el qual entra en estat líquid i gasós i surt en estat completament gasós.

La humitat que contenia aquest aire que resulta refrigerat es condensa a l'evaporador ja que les temperatures d'aquest són inferiors a les temperatures de rosada. Degut a això cal un sistema de drenatge per a aquesta aigua condensada per tal d'evitar l'aparició de bacteries que puguin afectar a la salut dels ocupants.

La **vàlvula d'expansió** s'instal·la a l'entrada de l'evaporador i normalment té aïllament tèrmic que la protegeix per evitar pèrdues i no afectar el cicle de compressió de vapor. S'encarrega de mantenir la diferència de pressions entre el circuit d'alta i baixa pressió. També regula el cabal d'agent frigorífic cap a l'evaporador tenint en compte la temperatura del refrigerant evaporat a la sortida. La vàlvula serveix per a reduir la pressió del líquid que la travessa i conseqüentment també la seva temperatura.

Hi ha dos tipus de vàlvules d'expansió, les capil·lars i les de bloc.

Les de bloc són les més habituals als vehicles (figura 5) i el seu funcionament es gestiona tèrmicament. Disposa d'una vàlvula de bola i un capçal tèrmic.



[32] Fig. 5. Vàlvula d'expansió

Cal observar a la figura 5 que la vàlvula d'expansió està comunicada amb l'evaporador tant a l'anada com a la tornada del fluid per tant treballa amb informació de tot el circuit i el regula.

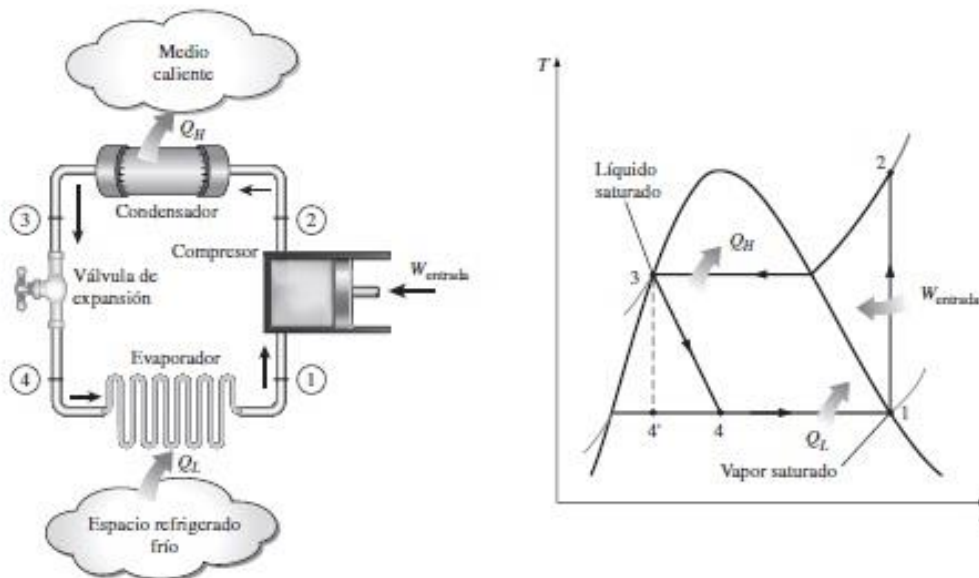


Aquesta vàlvula d'expansió té, al capçal tèrmic, un diafragma dotat d'una càrrega de gas especial. El costat oposat està comunicat amb l'escapament de l'evaporador a través d'orificis per a la compensació de pressió. La vàlvula de bola s'acciona a partir d'una vara d'èmbol. La temperatura governant al costat de baixa pressió determina la pressió del gas especial i a partir d'aquesta la quantitat de refrigerant que s'ha de deixar passar.

El **deshidratador** té com a funció filtrar l'agent frigorífic de partícules que es puguin despendre del compressor o altres components degut al desgast. Gràcies a això s'eviten obstruccions a la vàlvula d'expansió. També s'elimina la humitat que hagi pogut quedar dins del circuit durant el muntatge per tal d'evitar la formació de gel a dins del circuit. Per últim té la funció de dipòsit del fluid refrigerant per compensar les variacions de càrrega de cabal a la zona d'alta pressió.

Per finalitzar els **conductes de l'aire condicionat** són els elements encarregats d'unir tots els components entre ells i transportar el refrigerant. La composició d'aquests tubs és molt variada, ja que hi ha de materials com cautxú, metàl·lics i polimèrics. També s'han de considerar els colzes i les juntes.

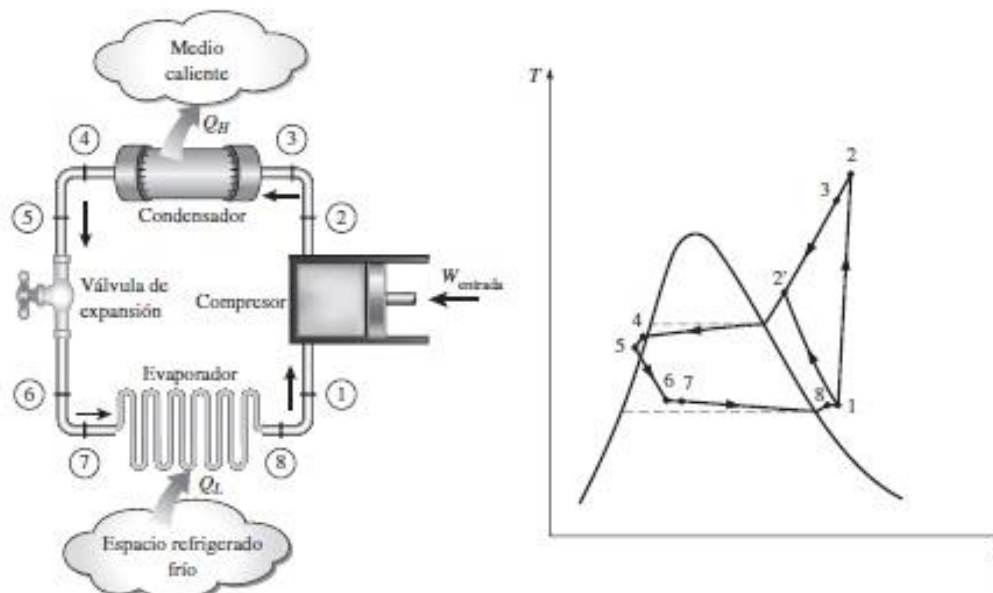
El cicle (figura 6) es basa en l'inicial elevació de la pressió i temperatura del vapor saturat (punt 1) fins arribar a la pressió de condensació del refrigerant (punt 2) en un procés isoentròpic quan aquest passa per el compressor. En aquestes condicions és quan el refrigerant travessa el condensador mentre intercanvia calor amb el medi exterior, en el cas d'un vehicle amb l'aire de fora. Degut a aquesta cessió de calor el fluid es condensa i es dirigeix cap a la vàlvula d'expansió en estat líquid a alta pressió (punt 3). Al travessar la vàlvula d'expansió la pressió baixa de forma adiabàtica (punt 4). A continuació el fluid refrigerant entra al evaporador i degut a la seva baixa pressió el fluid, en estat líquid, es vaporitza absorbint el calor de l'ambient on es troba, reduint així la temperatura a l'interior del vehicle. Un cop evaporat torna a ser absorbit pel condensador per començar el cicle de nou.



[28] Fig. 6. Cicle de compressió de vapor ideal

Per a prevenir la formació de gel al costat de l'evaporador, fet el qual reduiria la secció de pas d'aire que el travessa la temperatura de l'aire no pot ser inferior a 0°C. Per evitar això s'instal·la un sensor de temperatura al evaporador el qual regula el compressor.

El procés explicat anteriorment és l'ideal, s'ha de tenir en compte que en el procés real mostrat a la figura 7 la fricció té un pes important, ja que augmenta l'entropia i la temperatura. També s'ha de tenir en compte que al compressor no ha d'arribar líquid



[28] Fig. 7. Cicle de compressió de vapor real

per evitar que es trenqui. Per aconseguir estar segurs de que no arribin gotes de refrigerant al condensador es necessita treballar a règim sec, és a dir, que l'evaporador faci la seva funció correctament i evapori la totalitat del fluid que li arriba. La solució idònia és fer arribar un volum de refrigerant desitjat regulant-ho amb la vàlvula d'expansió provocant que el líquid es converteixi en vapor saturat abans de sortir de l'evaporador i hagi de recórrer un petit tram més de l'evaporador aconseguint així un sobreescalfament del vapor que surt finalment del evaporador (**punt 8**). Això millora també el rendiment frigorífic. No obstant des de la sortida de l'evaporador fins a l'entrada del compressor també hi ha pèrdues de pressió incrementant l'entropia, és per això que el **punt 1** varia del **punt 8**.

En el funcionament real del compressor (figura 7) hi apareix la fricció i també altres fenòmens que provoquen que el seu comportament sigui irreversible, la qual genera un augment de l'entropia (**procés 1-2**). La sortida real del compressor es determina coneixent el seu rendiment adiabàtic:

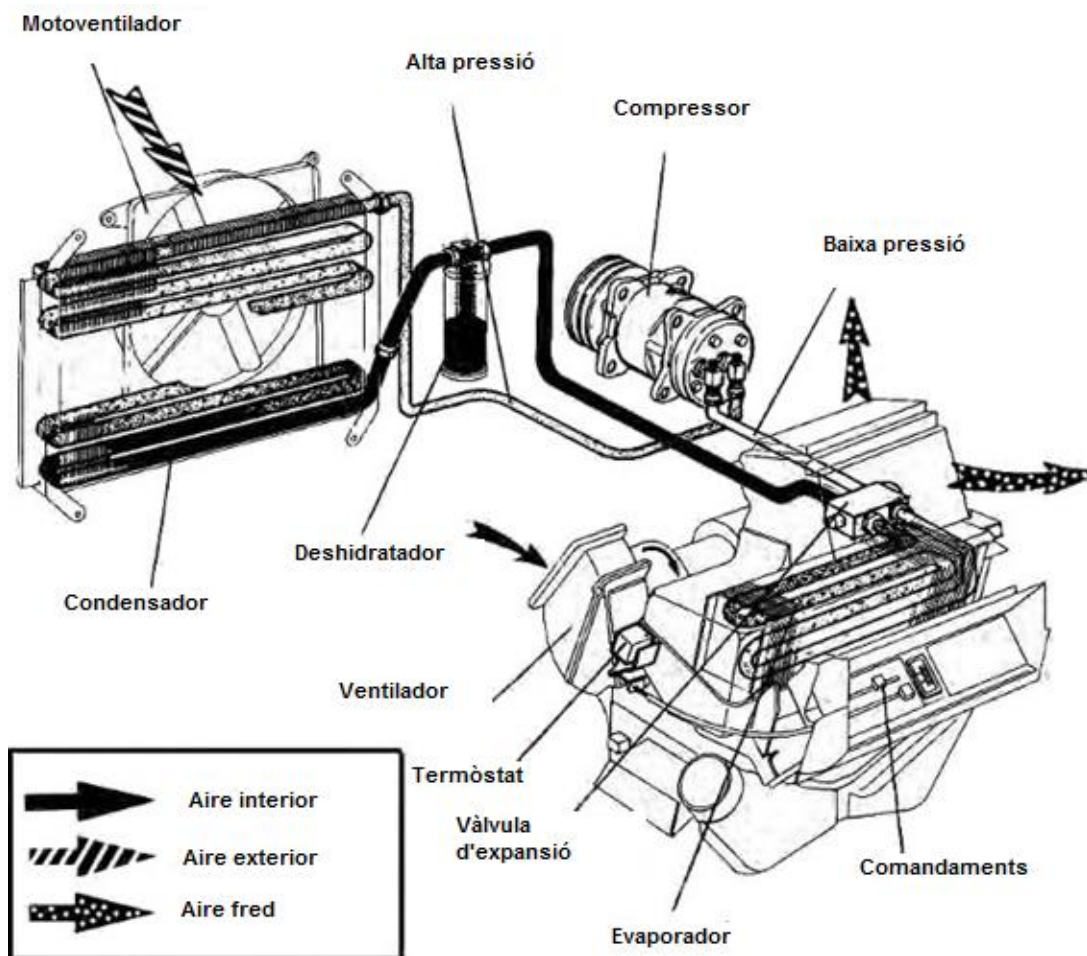
$$\eta_{compressor} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2'} - h_1}$$

Dins del condensador el refrigerant pateix una pèrdua de pressió com podem observar en el **tram 3-4**. També s'ha de tenir en compte que es produeix un subrefredament al

condensador per tal de reduir l'entalpia, augmentar l'efecte refrigerant i evitar que arribi vapor a la vàlvula d'expansió. Mentre el refrigerant en estat líquid circula fins a la vàlvula d'expansió cedeix una mica de calor a l'ambient, cosa que també afavoreix al subrefredament.

Com mostra el **tram 7-8** també hi ha una caiguda de pressió al vapor de la succió quan circula a través del evaporador, igual que en el **tram 6-7**. S'ha de procurar que aquestes caigudes siguin mínimes per tal de tenir la major eficiència possible.

Per tenir una idea més gràfica de tot aquest sistema a un vehicle i saber com són els fluxos d'aire podem observar la figura 8.



[39] Fig. 8. Direcció dels fluxos en un circuit d'AC

#### 4.4. Sistemes de calefacció del vehicle

En aquest apartat és on amb més facilitat es pot distingir entre un cotxe amb motor d'explosió i un elèctric i es un dels principals problemes pels fabricants dels segons.

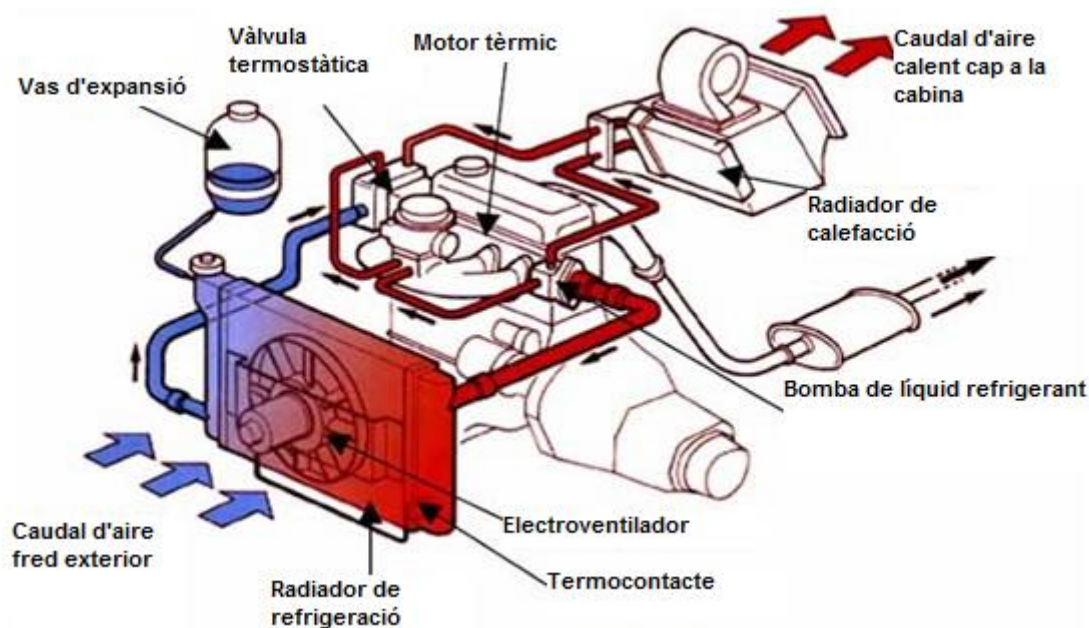
En un vehicle de motor d'explosió la calefacció es pot considerar gratuïta. Això és així perquè el rendiment del motor tèrmic és bastant baix i té una gran quantitat de pèrdues en forma de calor. Aquesta calor es dissipa gràcies a un radiador situat al frontal del



vehicle. Aquest radiador funciona amb un líquid refrigerant, el qual és una barreja d'anticongelant i aigua i aquesta barreja circula des de l'interior del motor fins al radiador on es refrigera gràcies a l'aire que entra, o bé per la pròpia velocitat del cotxe o forçat per un ventilador si el vehicle circula molt lentament o està parat.

Per tal de no desaprofitat totalment aquesta calor s'instal·la un circuit de toveres el qual fa circular una part de la barreja d'aigua i anticongelant que prové del radiador. Si aquest fluid és prou calent va a parar a un radiador situat sota del quadre de comandaments del cotxe i a través d'aquest radiador es fa circula un flux d'aire provinent de l'exterior impulsat per un ventilador que arriba a l'interior del vehicle escalfant-lo. El flux d'aire pot ser regulat pels passatgers així com també es pot regular la quantitat fluid que arriba al radiador de calefacció provinent de la refrigeració del motor amb una vàlvula.

Tot aquest procés es pot visualitzar amb facilitat a la figura 9.



[39] Fig.9. Circuit de calefacció d'un vehicle estàndard

Aquest sistema és l'utilitzat també als cotxes híbrids, ja que tot i utilitzar un motor elèctric com a suport no deixen de banda el motor de combustió interna i per tant poden aprofitar el calor residual d'aquest.

En vehicles moderns, de poca cilindrada i amb consums molt optimitzats, el calor dissipat al líquid refrigerant disminueix i en conseqüència també ho fa la prestació del sistema de calefacció. Per a aquests casos, i també en funció de les regions d'ambients més o menys freds on sigui destinat el vehicle alguns fabricants opten per afegir un calefactor auxiliar que s'alimenta a partir de l'energia elèctrica aportada per les bateries. Aquest calefactor està compost per resistències elèctriques situades a continuació del calefactor principal. Habitualment s'utilitzen elements calefactores ceràmics del tipus PTC (Positive Temperature Coefficient) que aporten entre 1 i 2 kW de potència tèrmica addicional als a prop de 8kW obtinguts amb el calefactor d'aigua. Aquests elements

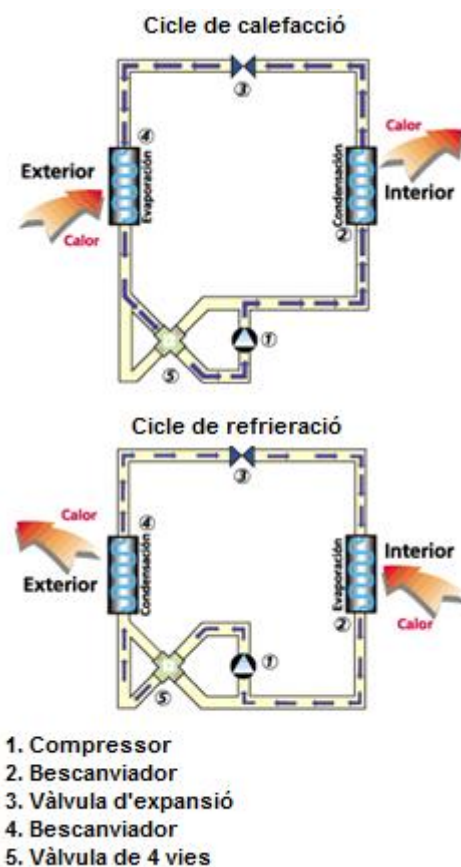
calefactors ceràmics redueixen automàticament el calor aportat a una temperatura definida per tal de ser un component segur.

En el cas dels cotxes elèctrics la implantació d'aquest sistema no és viable degut a que l'eficiència del motor elèctric és molt més alta que la del motor de combustió i per tant les pèrdues tèrmiques generades al motor i al transformador que l'alimenta són molt menors. Per aquest motiu els fabricants han de buscar alternatives per oferir calefacció a aquest tipus de vehicles. Inicialment alguns fabricants com per exemple Nissan amb el seu model Leaf van optar per instal·lar un sistema de resistències tèrmiques que escalfaven un fluid d'un petit circuit i aquest fluid es feia circular per una petita bateria per la qual circulava aire que s'escalfava i entrava a la cabina. Això es feia per temes de seguretat elèctrica i per evitar incendis, ja que si s'instal·la la resistència elèctrica just al quadre de comandaments del vehicle estaria massa a prop dels passatgers i hi podria haver problemes de descàrregues elèctriques o que es cremés la resistència. Aquests intercanvis de calor entremetjats perjudiquen l'eficiència del sistema de calefacció. A més, les resistències elèctriques són una de les maneres menys eficients de produir calor i per tant el consum és molt elevat, això implica un gran desavantatge per a un cotxe elèctric actual, ja que un dels seus punts dèbils és l'autonomia i un alt consum elèctric per part del sistema de calefacció redueix aquesta autonomia.

La solució final aplicada a tots els cotxes elèctrics recents ha estat aprofitar el propi sistema d'aire condicionat que duen instal·lant alguns nous elements per tal d'aconseguir una bomba de calor ja que les bombes de calor redueixen el consum elèctric per a la generació de calor respecte les resistències elèctriques.

A la figura 10 podem veure que amb la instal·lació d'una vàlvula de 4 vies a un circuit normal de AC es permet el canvi de sentit del refrigerant i per tant s'aconsegueix aquesta bomba de calor desitjada.

Per a veure gràficament com queda implantat aquest circuit de la bomba de calor en un cotxe elèctric, en concret el Renault ZOE podem parar atenció a la figura 11.

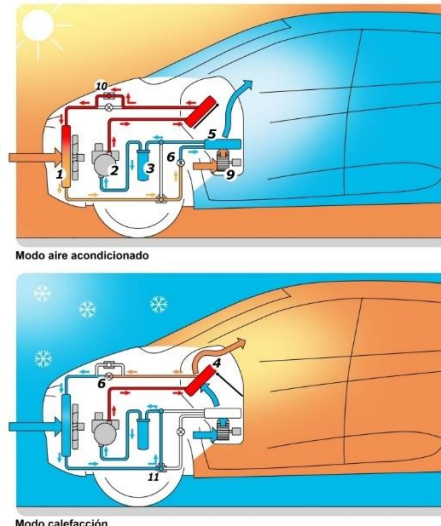


[40] Fig. 10. Circuit amb vàlvula de 4 vies

Bomba de calor



- 1 Condensador/evaporador exterior
- 2 Compresor elèctric
- 3 Acumulador
- 4 Condensador interior
- 5 Evaporador interior
- 6 Vàlvula de expansió
- 7 ECU para refrigeración
- 8 ECU para bomba de calor
- 9 Ventilador para
- 10, 11 Electroválvulas



[26] Fig. 11. Exemple funcionament d'una bomba de calor al Renault

## 4.5. Mòdul climatitzador

Per a unir el sistema d'aire condicionat amb el de calefacció i per tant, satisfer les necessitats tèrmiques dels ocupants del vehicle els dos sistemes s'uneixen a partir del mòdul climatitzador també anomenat HVAC (Heating, Ventilation i Air Conditioning). Aquest mòdul (fig. 12.) es compon per un mecanisme de canalització i distribució d'aire. Està format per un subconjunt d'entrada d'aire, un bufador, un conjunt d'actuadors, un subconjunt de caixes de distribució i un panell de comandament de tot aquest sistema.



[21] Fig. 12. HVAC

També cal saber que dins d'aquest mòdul és on es situa l'evaporador i els calefactores per resistència elèctrica si hi ha.

Gràcies a tots aquests components es garanteix un control sobre l'aire que entra al vehicle així com la distribució i mescles pertinents del circuit refrigerant a partir de les necessitats i control dels ocupants.

Tota aquesta unitat és instal·lada al darrere del panell d'instruments. La succió d'aire fresc es realitza a través d'una obertura que uneix el compartiment del motor i de la cabina que està situada just al davant del vidre frontal. Aquesta succió s'aconsegueix gràcies a un ventilador o un bufador que succona aire a través de la caixa d'aigües del vehicle. Òbviament aquesta entrada d'aire ha d'estar preparada per evitar la introducció de l'aigua de pluja o la neu a la cabina.

També existeix una funció (fig. 13) d'aquest mòdul la qual utilitza l'aire de l'interior de l'habitacle quan els ocupants ho desitgen, habitualment serveix per evitar la introducció

a la cabina d'olors exteriors i/o agents contaminants. Això s'aconsegueix gràcies a una entrada d'aire a la unitat HVAC la qual agafa aire de l'interior del vehicle i el fa circular com si fos aire provinent de l'exterior. Amb el procés explicat s'aconsegueix fer recircular l'aire de l'interior de la cabina i tornar a introduir-lo amb noves i millors condicions tèrmiques.



[21] Fig. 13. Botó recirculació

Aquesta recirculació d'aire també es recomanable quan es vol aconseguir una ràpida climatització de la cabina, ja que l'aire que entra al circuit està més pròxim a les condicions desitjades i per tant és més fàcil arribar-hi que no pas amb aire de l'exterior. La utilització d'aquesta tècnica a l'inici de la circulació estalvia una gran quantitat d'energia, ja que la potència requerida al compressor és molt inferior i per tant es redueix el seu consum.

En vehicles elèctrics és força recomanable la utilització d'aquesta tècnica per augmentar l'autonomia del cotxe.

No obstant l'aire recirculat no aporta oxigen nou, ja que no prové de l'exterior. A més, degut a l'acumulació de la humitat despresada pels ocupants la temperatura de rosada és superior a la temperatura dels vidres i aquest s'entelen, cosa que pot ser perillosa per a la conducció si no s'actua ràpid. És per això que la recirculació de l'aire interior no és recomanable per llargs períodes de temps.

A continuació de la zona d'aspiració d'aire i dins del mòdul de climatització es troba el filtre de l'aire el qual el neteja d'impureses, partícules i contaminants. Aquests filtres solen ser de carbó i requereixen d'una revisió regular per evitar l'obstrucció i garantir el correcte funcionament.

Després es troba el conjunt bufador el qual està format per un ventilador. Es tracta d'un bufador centrífug integrat al mòdul de climatització entre els conductes d'aspiració i l'evaporador. El motor elèctric d'aquest ventilador fa girar les pales creant un cabal d'aire que s'introdueix a l'interior de la cabina travessant prèviament l'evaporador i el calefactor si n'hi ha. Aquest cabal també és regulable per els ocupants.

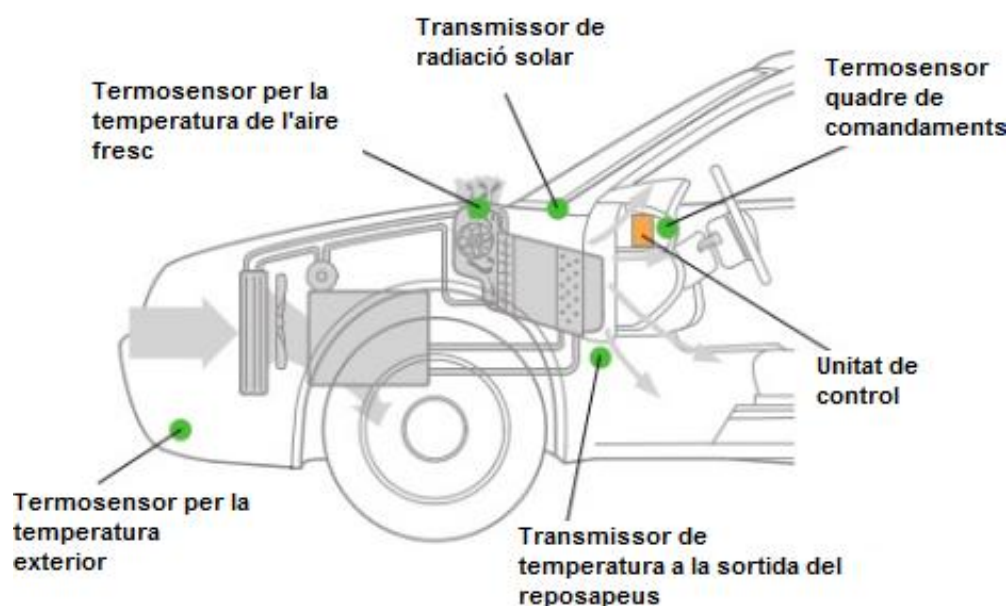
Per finalitzar l'aire entra dins d'un subconjunt de caixes destinades a regular i distribuir l'aire.

Aquestes caixes són l'estructura de tot el mòdul de climatització (HVAC). Totes aquestes peces estan muntades de forma que, si es requereix, puguin ser desmuntades i reparades o modificades.

Entre les caixes hi ha cavitats que actuen com a conductes i sortides per a la circulació de l'aire i per a la gestió dels flaps de regulació i distribució. Aquests flaps són elements de plàstic que regulen l'obertura i tancament dels conductes per tal que els ocupants puguin regular el cabal d'aire que hi circula i que arriba a la cabina. Els flaps estan dirigits per engranatges mecànics plàstics que s'accionen manualment o automàticament, depenent del vehicle, des de la unitat de control del climatitzador.



Per tal de regular la temperatura de l'aire desitjada pels passatgers existeix un sistema de flaps que dirigeix l'aire pels components necessaris a travessar abans que aquest arribi a l'interior del vehicle. El control d'aquesta temperatura es fa de forma manual en molts vehicles. No obstant existeixen climatitzadors de regulació automàtica els quals eliminen la necessitat de què el conductor reguli manualment la temperatura a través dels comandaments. Aquests climatitzadors disposen d'una centraleta o unitat de control que rep informació de termistors de temperatura tant exterior com interior i també un sensor de la radiació incident. La localització dels sensors es pot observar a la figura 14. A partir de la informació rebuda per aquests sensors un microprocessador integrat a la unitat de control calcula els valors necessaris per aconseguir les condicions ambientals ideals a l'interior de la cabina i regula els servomotors del climatitzador.



[28] Fig. 14. Disposició sensors de la unitat de control

Dins de les caixes és on s'hi troben l'evaporador i el calefactor juntament amb espumes aïllants tèrmiques i sonores que eviten pèrdues i sorolls a la cabina.

Existeixen tres sortides típiques per l'aire del climatitzador, que són als peus, al cos o cap al parabrisa. Aquestes sortides s'obren i tanquen segons vulguin els ocupants oferint la possibilitat de combinar-les. Alguns vehicles disposen també sortides per als seients del darrere (figura 15).



[28] Fig. 15. Sortides típiques d'aire

En els climatitzadors més avançats s'hi diferencien àrees a climatitzar a l'interior d'una mateixa cabina. Això vol dir que el conductor i els seus acompanyants poden rebre temperatures diferents si ho desitgen gràcies a que les sortides d'aire situades a les seves respectives zones estan controlades de forma individual pel climatitzador. Existeixen diferents modalitats d'aquest tipus de climatització. Hi ha la bi-zona la qual només regula dos espais, la zona del conductor i la zona del copilot, la tri-zona la qual es igual que la bi-zona però inclou una tercera àrea de climatització per als seients del darrera i per últim una climatització de 4 zones la qual proporciona un control individual sobre les condicions de climatització per a cadascun dels ocupants tant als seients del davant com als del darrera.

Hi ha tres modes bàsics inclosos a la majoria de vehicles que són escalfador, descongelació i aire condicionat. També existeixen modes mixtos a alguns vehicles com podrien ser a dos nivells, barreja o sistema ambiental.

En el mode escalfador el flux màxim és de 60 a 95 l/s per a un cotxe de mida mitja generalment es distribueix a la part dels peus a la zona davantera i cap a dalt a la zona del darrera. Aquesta distribució propera al terra del vehicle fa que la sensació de confort sigui més alta ja que el xoc directe sobre l'ocupant no és desitjable i si també s'aconsegueix que l'aire a mitja alçada a la zona de respiració sigui una mica més fred i confortable. Els fabricants han dissenyat aquest mode de forma que aproximadament un 20% del flux de l'aire es dirigeixi a la zona del parabrisa per evitar l'entelament degut a l'augment de temperatura interior.

El mode de descongelació s'utilitza per netejar el parabrisa de les gelades i la boira tant interna com externament. El flux màxim d'aire d'aquest mode és d'entre 70 i 95 l/s per a un automòbil de mida mitja. Aquest mode es incompatible amb el de recirculació d'aire, ja que aquest afavoreix l'entelament que és el que es pretén eliminar.

Alguns vehicles disposen de fils calefactors incrustats al vidre per tal de descongelar-los.

El mode d'aire condicionat està previst per a la refrigeració de l'interior del vehicle, ventilar la cabina i aconseguir el confort dels ocupants. El flux d'aire típic és d'entre 95 i 145l/s a un cotxe mitjà i ha de ser capaç de reduir la temperatura de la cabina de la manera més ràpida possible. La direcció d'aquest flux d'aire és escollida pels ocupants per tant si es desitja pot incidir directament al cos dels ocupants. La velocitat mínima de l'aire és de 10m/s i sol ser utilitzada per mantenir unes condicions de confort ja assolides.

Cal mencionar també els modes mixtos, començant amb el mode a dos nivells. Aquest és utilitzat quan les condicions ambientals moderadament fredes i una alta incidència solar. Per combatre aquesta càrrega solar el sistema proporciona aire fred a mitja alçada, tenint en compte que aquestes sortides es poden tancar, i aire calent al terra. Amb això s'aconsegueix proporcionar una refrigeració a les àrees que reben radiació solar i calefacció a les zones que no hi ha.

El mode de barreja és molt útil durant les nevades. Consta d'una proporció d'aire calent a dins de la cabina i per a descongelar el parabrisa. L'aire calent es necessari per al confort dels ocupants i una petita proporció d'aquest aire es dirigeix al parabrisa per evitar que es congeli però tampoc es vol la màxima descongelació.

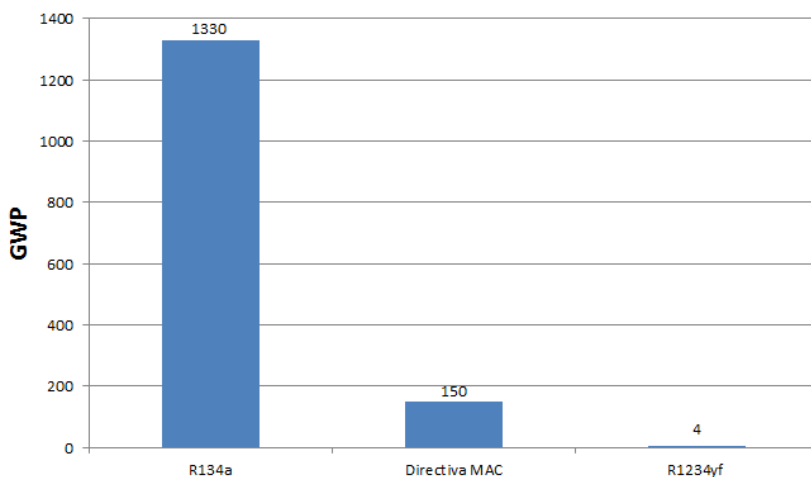
Per últim el mode ambiental serveix per mantenir unes condicions temperades sense requerir un flux d'aire massa alt i evitant la incidència sobre els passatgers. Per aconseguir-ho les sortides d'aire són cap al sostre del vehicle i/o cap als laterals. Aquest mode és un dels menys habituals, ja que depèn molt del nombre de sortides d'aire no dirigides cap als ocupants de les que disposa el vehicle.

## 5. REFRIGERANTS

### 5.1. R1234yf

El R1234yf es tracta d'un Hidrofluorolefi (HFOs) compost per hidrogen fluor i carboni. Aquest gas també es conegut com a 2,3,3,3-tetrafluorpropè ( $C_3F_4H_2$ ). És una de les alternatives amb més potencial del R134a degut a que té un valor de potencial d'esgotament de l'ozó de 0 i una GWP de 4, el qual és un valor significativament més petit que no pas la GWP del R134a i també que la normativa vigent per a MAC, tal i com podem observar a la figura 16 .

Aquest gas va ser desenvolupat per les empreses Honeywell i DuPont per tal de satisfer la directiva europea 2006/40/CE la qual buscava un substitut per al gas R134a amb una GWP inferior a 150, requisit el qual molt pocs refrigerants compleixen.



[Elaboració pròpia] Fig. 16. Comparativa de GWP

Tot i que està classificat com a gas lleugerament inflamable s'ha demostrat que no hi ha possibilitats d'aquest succés en les condicions normalment experimentades pels vehicles. No obstant alguns fabricants com el grup Daimler AG (Mercedes-Benz) han realitzat les seves pròpies proves i han decidit que no volen utilitzar aquest gas per que no el troben suficientment segur relacionat amb la inflamabilitat. Altres fabricants alemanys segueixen el camí de Daimler AG i es proposen canviar del gas R134a al R744 progressivament a tots els seus models a partir de l'entrada en funcionament de la Directiva europea 2006/40/CE. Cal indicar que alguns models elèctrics com el eGolf de Volkswagen fabricats al 2017 porten sistemes que funcionen amb el R1234yf.



Propietats termodinàmiques	R134a	R1234yf
Massa molar (kg/kmol)	102.03	114.04
Punt ebullició a 1 atm (K)	247.08	243.70
Punt congelació (K)	169.85	desconeguda
Temperatura crítica (K)	374.21	367.85
Pressió crítica (Mpa)	4.06	3.38
Densitat crítica (kg/m <sup>3</sup> )	511.9	478.01

[Elaboració pròpia] Taula 1. Comparativa R134a i R1234yf

La taula 1 mostra que les propietats termodinàmiques d'aquests dos refrigerants són força similars, sobretot en massa molar i temperatura crítica. Això fa que el R1234yf sigui un bon recanvi de l'actual R134a.

Als annexos [51] podem observar una taula on indica els models d'alguns fabricants que ja utilitzaven R1234yf al 2016.

## 5.2. CO<sub>2</sub>

El diòxid de carboni és un “refrigerant natural” que des de fa temps ha estat estudiat i utilitzat com a gas refrigerant per la indústria. En el món de la refrigeració se'l coneix com R744 i sens dubte en aspectes mediambientals és el que més destaca dels analitzats al projecte. Els principals aspectes positius que presenta és que el seu GWP és d'1, per tant compleix totes les legislacions actuals, és un gas no inflamable, a més la seva producció és molt senzilla i es podria aprofitar el CO<sub>2</sub> resultant obtingut a alguns processos industrials. També s'ha de considerar que no és corrosiu amb la majoria de materials.

Altres avantatges que té és que té una capacitat frigorífica alta a causa de l'alta capacitat volumètrica de refrigeració. Això deriva en una bona transferència de calor en l'evaporador, condensador i refrigerador de gas així com una major eficiència isoentròpica del compressor.

Des de l'aparició el 2006 de la directiva europea per a MAC els fabricants van intensificar els esforços per dissenyar sistemes d'AC amb aquest gas, ja que anteriorment no era un sistema gens habitual. Tot i que la majoria de fabricants van optar per desenvolupar els seus nous sistemes de climatització amb R1234yf alguns altres van optar per el R744 i tenen pensat implementar-los gradualment en els seus nous models, com per exemple el fabricant Volkswagen.

## 6. COMPARATIVA DELS REFRIGERANTS

### 6.1. R134a vs R1234yf

En aquest apartat es farà una comparativa entre el R134a i el R1234yf per veure els aspectes positius i negatius que pot tenir la substitució del R134a en els sistemes MAC i si hi ha canvis significatius en les instal·lacions per al refrigerant.

Per començar s'estudiaran les característiques mediambientals i de seguretat, a continuació es compararan les propietats termofísiques més determinants. Per finalitzar es presentaran i analitzaran comparacions realitzades pel món científic entre aquests refrigerants.

El valor de 4 de GWP del R1234yf es gairebé insignificant des del punt de vista a la contribució del canvi climàtic, complint la Directiva Europea vigent. A més, encara sembla més insignificant tenint en compte que substitueix el R134a el qual té un valor de GWP moltíssim més elevat com podiem veure a la figura 16. També s'ha de considerar que el R1234yf no conté clor a la seva composició molecular per tant el seu potencial d'esgotament de l'ozó és igual a 0. Per un altre banda el temps de permanència a l'atmosfera d'aquest gas és d'11 dies en front dels 14 anys que pot durar el R134a.

En quant a toxicitat es pot afirmar que els resultats obtinguts en experiments amb rates, algues i peixos per el doctor Koban el 2009 no mostren una perillositat ni major ni menor respecte al R134a, és a dir en aquest aspecte són considerats iguals.

La descomposició atmosfèrica del R1234yf produeix àcid trifluoroacètic el qual és susceptible de deposició humida i seca. No obstant degut a la curta vida atmosfèrica d'aquest gas la seva deposició i concentració d'aquest àcid es un paràmetre molt variable depenent de l'entorn i les condicions atmosfèriques i mediambientals del moment i l'entorn. El 2012 es va fer un model per avaluar el canvi de la qualitat de l'aire a Europa degut a les possibles fuites de R1234yf en els sistemes MAC suposant que aquest gas substitueixi completament el R134a. L'índex mig de deposició seca i humida d'àcid trifluoroacètic és d'entre 0.65 i 0.76 kg/km<sup>2</sup>any amb un màxim de 2.0kg/km<sup>2</sup>any al nord d'Itàlia. Les concentracions pic anuals són de 2500ng/L, és a dir, 60 cops menor que la concentració mínima susceptible de ocasionar danys a les formes de vida aquàtiques més sensibles. Per tant es pot considerar que la seva toxicitat és menyspreable.

Respecte a la seguretat la major preocupació produïda per la implantació del R1234yf es la seva inflamabilitat degut a que es considera que té inflamabilitat mínima. En canvi el R134a no és inflamable.

L'energia mínima d'ignició d'aquest gas és d'entre 5000 i 10000 mJ, el qual és un valor bastant alt si el comparem amb combustibles com per exemple el metà, que té una energia mínima d'ignició de 0.29mJ.

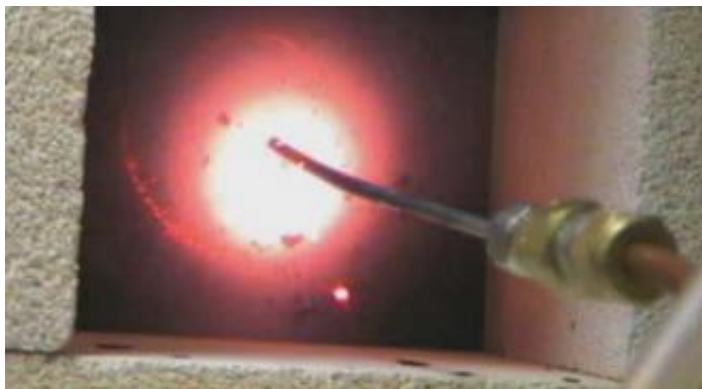
A la següent taula es presenten els resultats d'un assaig d'ignició (taula 2) a partir d'una fuga en un sistema MAC realitzat el 2009. Els assajos indiquen que és poc probable que el flux sorgit de fugues del gas pugui encendre's a partir de fonts d'ignició habituals.

Test	Ignición de R1234yf
Cigarreta encesa	No
Filferro incandescent	No
Flama encesa amb butà	Débil
Filferro de nicrom fos	Si

[16] Taula 2. Probes ignició R1234yf

Un altre estudi que compara aquests dos refrigerants és el realitzat pel propi fabricant del R1234yf, l'empresa DuPont.

Aquest estudi es basa en l'avaluació de la ignició de tant el refrigerant R1234yf com el R134a en contacte amb una superfície metàl·lica calenta simulant ser el col·lector d'un cotxe. Aquesta superfície té un gruix de 6mm d'acer i està escalfada per un bufador de propà en el costat contrari d'on es fa l'assaig. En el costat on no hi ha flama és on s'aplica el refrigerant testejat tal i com podem observar a la figura 17.



[19] Fig. 17. Assaig d'ignició mitjançant una placa metàl·lica

L'assaig es realitza amb tres temperatures diferents (550, 800 i superior a 900) fàcilment identificables per la diferència de color de la làmina d'acer calenta. S'utilitza un termòmetre infraroig per assegurar que les temperatures són les correctes.

El mateix refrigerant és analitzat 3 cops a cadascuna de les temperatures per tal de saber amb exactitud que i com pot provocar la ignició. Una d'elles és el refrigerant sol aplicat amb un esprai, la següent és el refrigerant inicialment barrejat amb aire i per últim barrejat amb un oli PAG (polialquilenglicol) que és un dels lubricants habituals que acompanyen els refrigerants dins dels circuits.

Els resultats d'aquest anàlisi són els següents:

		Temperatura de la làmina d'acer		
		550°C	800°C	>900°C
R134a	Esprai sense oli	Sense ignició	Sense ignició	Sense ignició
R134a	Inicialment barrejat amb aire	No assajat	Sense ignició	Sense ignició
R134a	Amb oli PAG	Sense ignició	Sense ignició	Amb ignició
R1234yf	Esprai sense oli	Sense ignició	Sense ignició	Sense ignició
R1234yf	Inicialment barrejat amb aire	No assajat	Sense ignició	Sense ignició
R1234yf	Amb oli PAG	Sense ignició	Sense ignició	Amb ignició

[19] Taula 3. Resultats assaig d'ignició

Podem afirmar que els dos únics successos on apareix ignició estan molt influenciats amb el lubricant que acompanya al refrigerant. Probablement l'inici de la flama sigui provocat exclusivament per l'oli PAG i només en casos amb temperatures realment altes que es poden considerar poc probables. A la vista dels resultats en contacte amb un metall molt calent no és més perillós el R1234yf que el R134a.

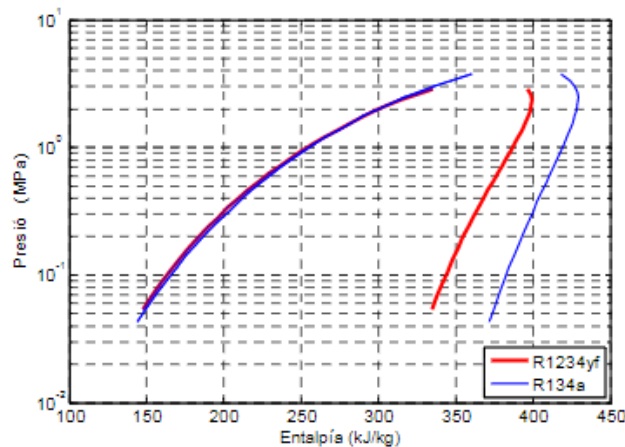
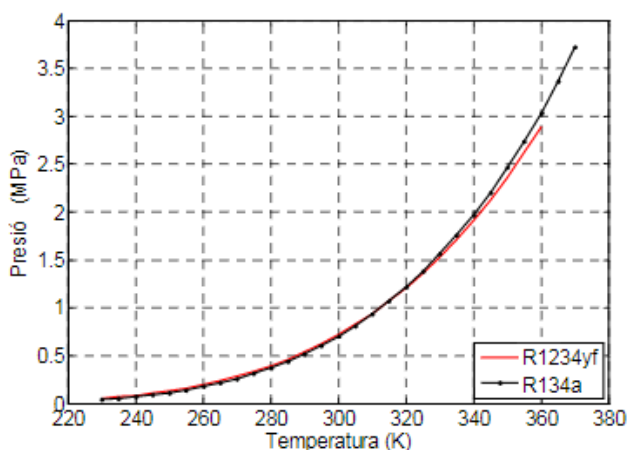
Un altre possible forma d'iniciar una flama a partir d'una fuga de refrigerant és a través d'una espurna i la més probable font d'espurnes és amb un curtcircuit d'una bateria de 12V. DuPont ha simulat també aquesta situació introduint una barreja d'aire a 23°C i 50% d'humitat relativa i R1234yf dins d'un matràs de vidre segellat de 12 litres. Dins d'aquest matràs també hi ha dos elèctrodes de coure de 9,5mm que són els encarregats de generar l'espurna a partir d'una bateria de 12V i 1020A simulant l'arrencada del motor.

S'hi prova una concentració de 8,13%, de 8,5% i de 9% de R1234yf dins del matràs a temperatures de 20°C, 60°C i 80°C totes les concentracions. Es generen 10 espurnes amb cadascuna de les temperatures i concentració de refrigerant i el resultat és negatiu en tots els assajos.

Com hem pogut observar a l'anterior descripció del R1234yf les seves propietats termodinàmiques són molt similars a les del R134a. A continuació es presentaran les propietats termofísiques dels dos refrigerants comparats on es podrà observar que aquestes propietats també son força similars. Podem veure a la taula i a les figures 18 i taula 4 com de similars són tots dos gasos.

Propietats a 25°C	R1234yf	R134a
Presió d'evaporació (MPa)	0.677	0.665
Presió de condensació (Mpa)	2.44	1.63
Densitat del líquid (kg/m <sup>3</sup> )	1094.0	1207.0
Densitat del vapor (kg/m <sup>3</sup> )	37.6	32.4
Viscositat del líquid (μPa/s)	155.45	194.89
Viscositat del vapor (μPa/s)	12.29	11.69
Conductivitat tèrmica del líquid (mW/mK)	63.59	81.13
Conductivitat tèrmica del vapor (mW/Mk)	13.97	13.83
Calor específic del líquid (kJ/kgK)	1.39	1.43
Calor específic del vapor (kJ/kgK)	1.05	1.03

[Elaboració pròpia] Taula 4. Propietats termofísiques



[28] Figura 18. Gràfica comparativa Ph i PT

Varietat de científics han realitzat treballs d'investigació simulant les condicions d'una instal·lació d'aire condicionat mòbil i comparant aquests dos gasos refrigerants. A continuació s'exposaran els resultats obtinguts en cadascuna d'aquestes investigacions.

Per començar, l'equip de científics Zilio C., Brown J.S., Schiochet G. i Cavallini A. van concloure el 2011 [8] que els resultats de la potència frigorífica i el COP obtinguts amb el R1234yf era considerablement menor que amb el refrigerant R134a però si es realitzaven algunes petites modificacions com reajustar la vàlvula d'expansió i el compressor aquest rendiment i el COP podien millorar notablement i apropar-se als resultats del R134a.

Segons els resultats obtinguts el 2011 pels científics M. Bryson, C. Dixon i S. St Hill [12] la capacitat frigorífica del R1234yf es un 4% menor i el seu COP un 5% menor si es substitueix directament aquest refrigerant en un sistema desenvolupat per el R134a. El

científic Lee GH va obtenir uns resultats encara més baixos on s'indicava que el COP era tan sols un 2,7% menor i la capacitat frigorífica un 4%.

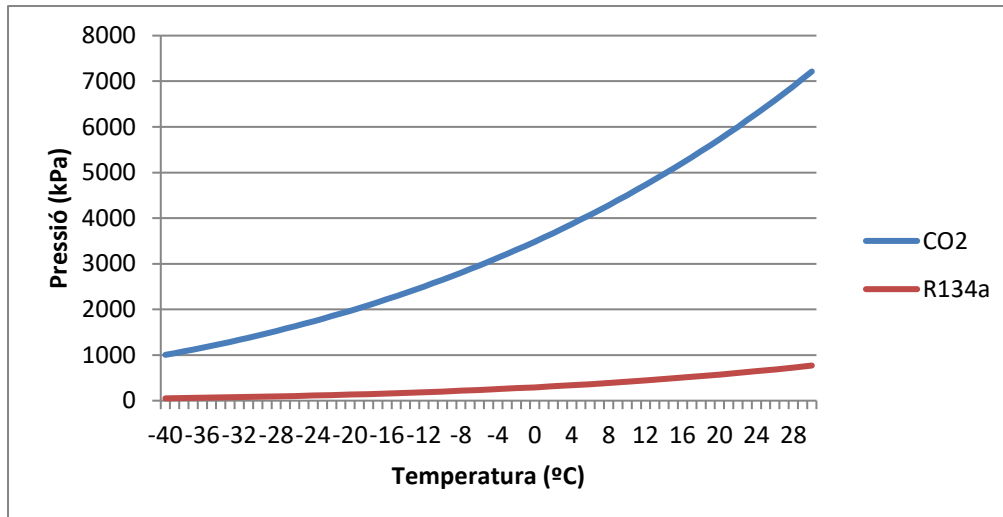
Per últim els resultats mostrats a la publicació *Study of Refrigeration System with HFO1234yf as a Working fluid* del científic Sad Jarall al 2012 mostren que la capacitat frigorífica es entre un 3,4 i un 13,7% menor, el COP entre un 0,35 i un 11,88% i l'eficiència del compressor també pot ser menor, en concret entre un 0 i un 6,3%.

En base a tot l'exposat anteriorment es pot afirmar que el refrigerant R1234yf pot ser un bon substitut del R134a ja que les seves propietats físiques són molt similars alhora que s'ha demostrat, pels estudis anteriors, que el rendiment frigorífic obtingut al implantar-lo en un sistema dissenyat per l'ús de R134a no és significativament menor. Si s'ha de canviar de refrigerant en models de vehicles ja dissenyats i actualment en producció el canvi directe cap a R1234yf és una solució econòmica i prou efectiva per a les marques. Si s'està disposat a realitzar petits canvis al disseny de la instal·lació per aconseguir el mateix rendiment i COP el cost econòmic material no seria excessiu.

## 6.2. CO<sub>2</sub> (R744) vs R134a

A continuació es farà una breu comparació general de tot dos refrigerants i a després es presentarà un estudi realitzat per el Centre Tecnològic de Transferència de Calor [4] on s'analitza una instal·lació que utilitza CO<sub>2</sub> com a refrigerant i es comparen els resultats amb una instal·lació estàndard que utilitza R134a. Seguidament es presentarà un altre estudi on s'aplica la refrigeració amb el gas R744 a un vehicle. Aquest últim estudi ha estat realitzat pel grup Volkswagen, que com s'ha explicat anteriorment està força interessat en introduir els sistemes de refrigeració per CO<sub>2</sub> com a substitut del R134a. A més es comentaran els resultats obtinguts.

Per començar es necessari dir que la refrigeració mitjançant CO<sub>2</sub> no és massa habitual avui en dia si es compara amb el R134a tot i que es tracta d'un gas molt més fàcil d'aconseguir. El gas és més econòmic però la seva instal·lació és generalment més cara ja que els components són diferents als utilitzats amb la resta de refrigerants HFC, no obstant si es poden arribar a aconseguir. Degut a l'alta pressió a la qual treballen els sistemes que utilitzen el CO<sub>2</sub> com a refrigerant els sistemes són més complexos i tenen les seves pròpies regulacions com per exemple la ISO 5149. A la figura 19 es poden observar les significants diferència de les condicions d'operació relacionades a la pressió entre diferents refrigerants.



[Elaboració pròpia] Figura 19. Comparativa Pressió-Temperatura CO<sub>2</sub> i R134a

A diferència del R134a que sempre treballa de forma subcrítica el CO<sub>2</sub> és més habitual veure'l treballant de forma transcrítica.

Ja que l'índex de compressió del R744 és superior al del R134a també ho serà la seva temperatura de descàrrega i la seva eficiència isoentròpica.

Degut a l'alta capacitat volumètrica del R744 el desplaçament requerit del compressor és menor. A més degut a que la secció del tub de succió és proporcional a la capacitat volumètrica aquesta serà bastant menor que en el cas del R134a.

El primer estudi que s'analitzarà està compost per un anàlisi numèric que segueix uns algorismes i un anàlisi experimental. Pel anàlisi experimental es van utilitzar un compressor alternatiu per a diòxid de carboni, un refredador de gas doble, un evaporador doble i una vàlvula dosificadora. A més utilitza aigua per a refredar el gas.

A la taula 5 es mostren els resultats comparatius pel model numèric i l'experimental de l'estudi d'una instal·lació de R134a amb un compressor amb una cilindrada de 8cm<sup>3</sup>. Aquesta comparativa s'utilitza per saber si el model experimental és fidel a la realitat i pot ser utilitzat en altres estudis. Com podem veure a la taula 5 hi ha 2 casos numèrics amb els seus corresponents experimentals on el que varia és la temperatura d'evaporació.

	Tevap (°C)	Pin (bar)	Pout (bar)	Tout (°C)	m(kg/h)	ηvol (%)	We(W)	Qev (W)	ω (rpm)	ηs(%)	COP
númerica	-10	2.01	14.89	92.5	8.61	66.9	232.5	405.7	2946	69.5	1.745
experimental	-10	2.01	14.89	83.7	8.13	73.4	222.3	375.5	2938	72.6	1.687
númerica	7.2	3.77	14.89	87.3	18.43	72.2	329.3	847.6	2904	64.4	2.574
experimental	7.2	3.77	14.89	83.8	17.42	81.5	310.7	769.6	2938	68.2	2.538

[4] Taula 5. Comparació entre estudi numèric i experimental amb R134a

Segons aquests dos estudi la variació del flux màssic i de la potència consumida és d'aproximadament 5% i la del COP un 3%, per tant es pot considerar que el model numèric es prou fiable i s'apropa a la realitat.



A la taula 6, on T1 és la temperatura a la sortida del compressor, T2 és la temperatura del refredador de gas, T3 és l'entrada a l'evaporador i T4 és l'entrada al compressor, es poden observar els resultats obtinguts numèricament amb software i experimental amb la instal·lació que utilitza el R744.

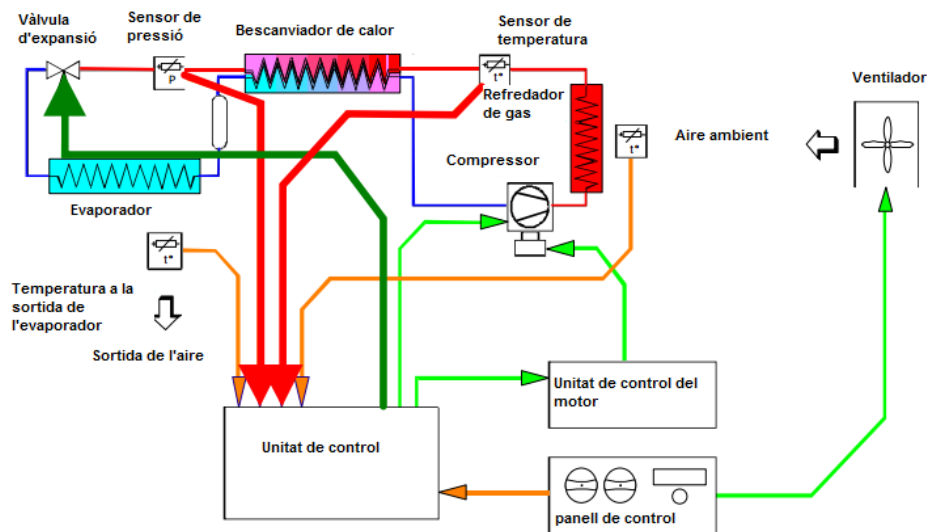
	Pgc(bar)	Pev(bar)	T1 (°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	m(kg/h)	We	Qev	COP
numèrica	75.83	35.26	96.07	25.38	0.49	14.36	13.48	319.54	699.85	2.19
experimental	75.83	35.01	94.05	25.04	0.18	14.33	13.02	297.07	687.01	2.313

[4] Taula 6. Comparació entre estudi numèric i experimental amb R744

Comparant els resultats d'aquesta última taula amb la taula 5 quan treballen sota condicions similars es pot observar que s'obté un COP similar entre el sistema amb CO<sub>2</sub> i el que utilitza R134a. També s'observa que la capacitat frigorífica són bastant similars si les temperatures de treball també son similars. S'ha de considerar que en aquest estudi, com s'ha explicat, s'utilitza aigua per a refrigerar el gas mentre que en el cas d'un vehicle s'utilitzaria l'aire exterior, per tant els resultats també es poden veure alterats per la diferència d'eficiència del refrigerador de gas.

Seguidament s'exposa l'estudi realitzat pel grup Volkswagen on s'analitza un sistema d'AC instal·lat en un vehicle i com afecten diferents factors com la velocitat del vehicle i les condicions de l'entorn.

La instal·lació està composta per un refredador de gas, un ventilador que acciona aire ambient cap al refredador de gas per tal d'ajudar-lo a realitzar la seva funció, un compressor, un evaporador, un petit dipòsit, una vàlvula d'expansió i un bescanviador de calor que pretén ajudar en l'eficiència gràcies l'intercanvi energètic entre la sortida de l'evaporador i del refredador de gas. Tot això està controlat per una unitat de control que recopila informació de diversos sensors de temperatura situats a la instal·lació i d'un sensor de pressió instal·lat just abans de la vàlvula d'expansió. Tota aquesta instal·lació la podem observar a la figura 20.



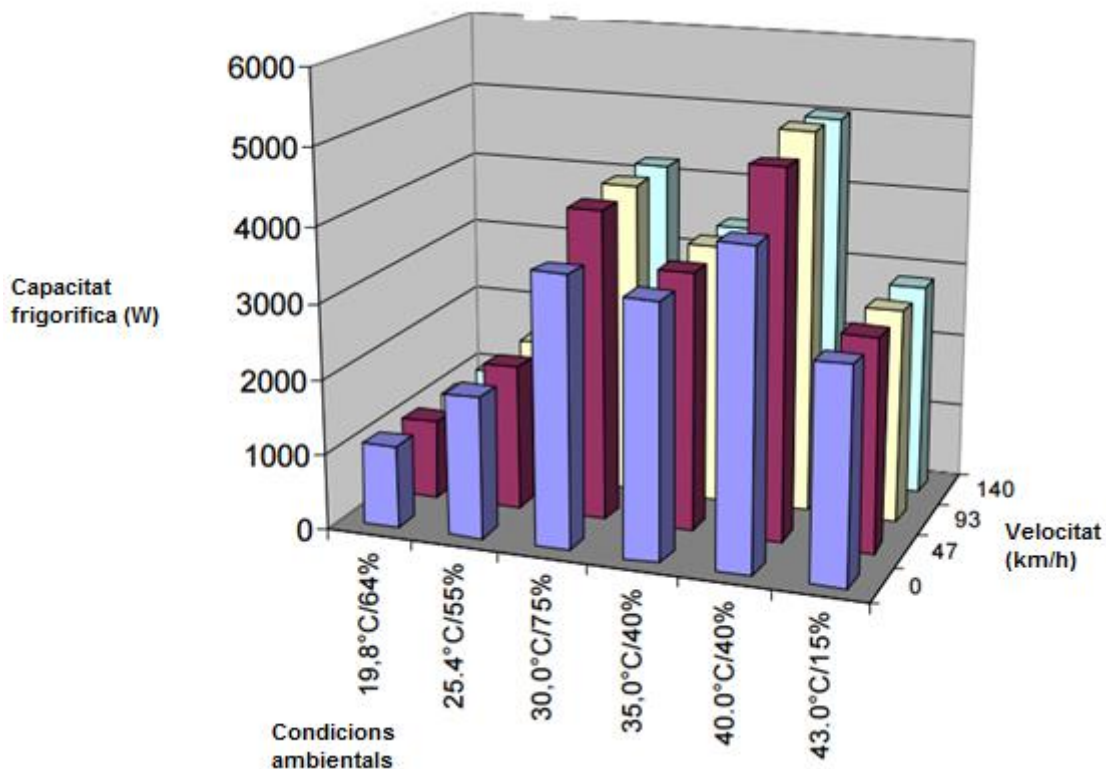
[21] Figura 20. Instal·lació amb R744 proposta pel grup Volkswagen



Primerament s'exposen les característiques principals d'un cicle de refrigeració amb CO<sub>2</sub> que són:

- L'existència d'un COP òptim que s'aconsegueix a una alta pressió del refrigerant.
- El COP depèn molt del flux d'aire que travessa el refredador de gas.
- Els COPs més alts s'aconsegueixen a temperatures d'entorn baixes.
- La disposició d'un intercanviador de calor al circuit aconsegueix augmentar la capacitat frigorífica a temperatures d'entorn altes i per tant també incrementa el COP.

A continuació s'estudia la capacitat frigorífica del R134a amb condicions d'entorn molt diverses i també a diferents velocitats de circulació del vehicle. Els resultats obtinguts són els mostrats a la figura 21.



[21] Figura 21. Resultats d'un estudi del refrigerant R134a on es mostra la capacitat frigorífica depenent de diferents condicions de velocitat i ambientals

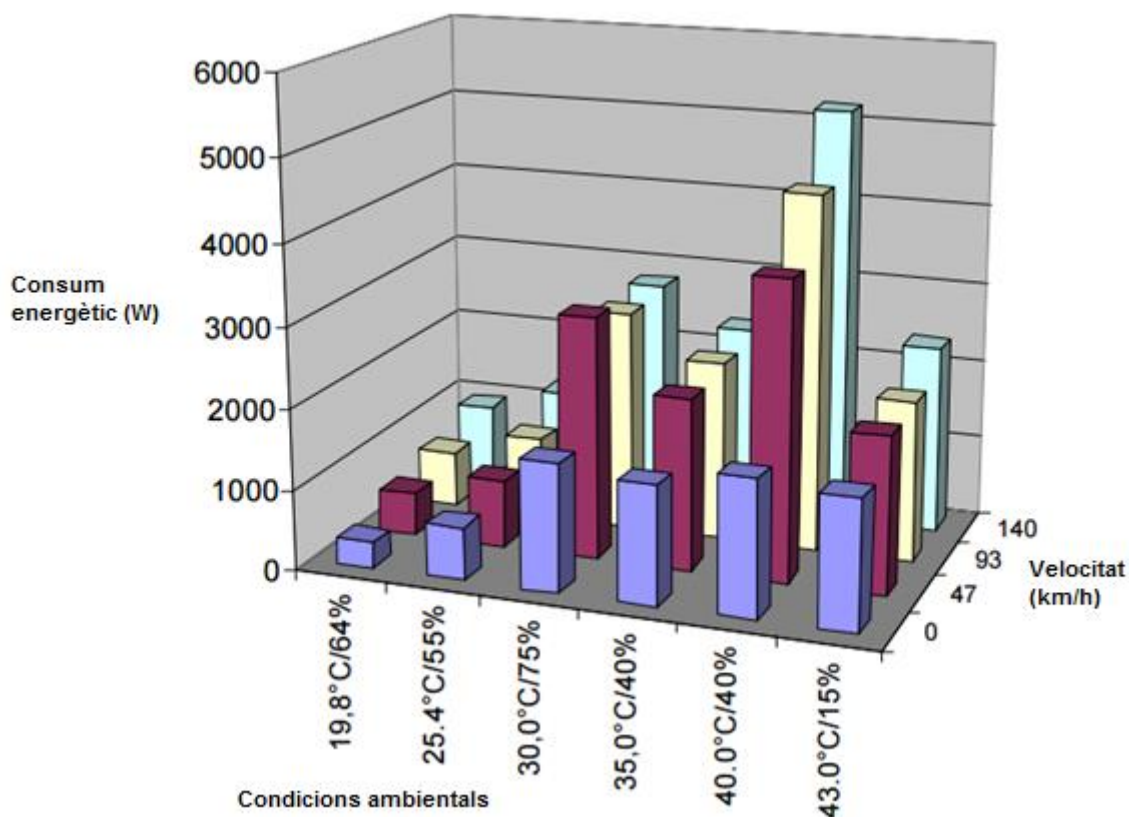
D'aquest gràfic resultant es poden extreure diverses conclusions. Per començar es pot afirmar que la velocitat del vehicle no afecta a la capacitat frigorífica excepte en casos de temperatures ambientals altes i amb humitats relatives també altes, com el cas de 30°C i 75% d'humitat relativa o bé amb temperatures ambientals molt altes com en el cas de 40°C i 40% d'humitat relativa. També es pot dir que la capacitat frigorífica com era

d'esperar augmenta notablement al incrementar-se la temperatura i també la humitat relativa.

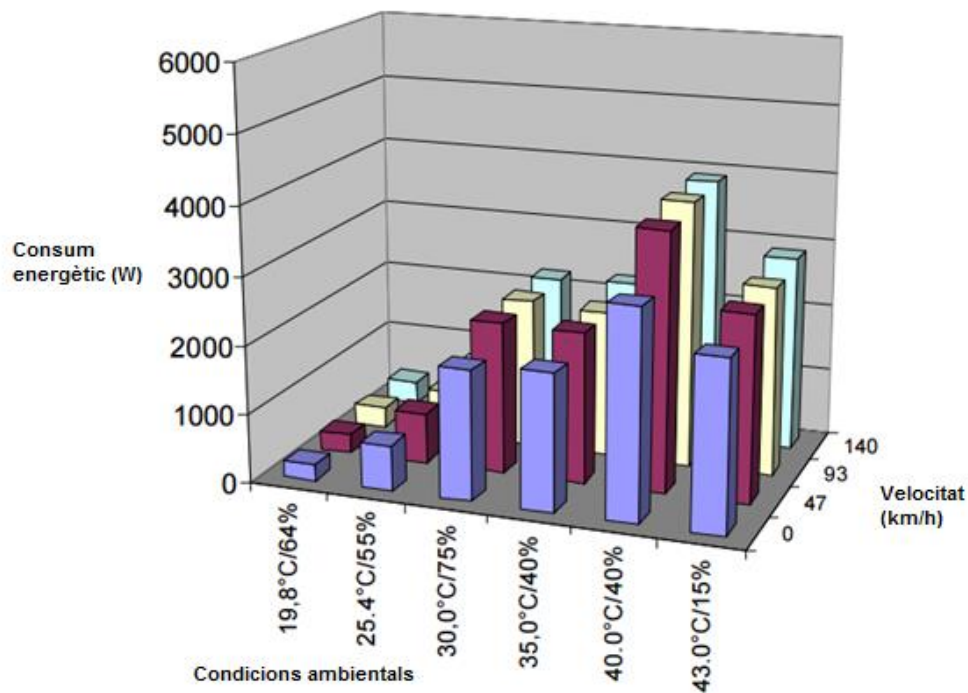
Prenent com a referència les diferents capacitats frigorífiques obtingudes a la gràfica anterior s'analitza la potència consumida per el propi sistema amb R134a. Es fa el mateix estudi per a un sistema que utilitza CO<sub>2</sub> com a refrigerant i ha d'aconseguir les mateixes capacitats frigorífiques.

Per a poder interpretar les gràfiques que s'exposaran a continuació i poder entendre la variació de la potència consumida respecte de la velocitat del cotxe s'ha de tenir en compte que a major velocitat del vehicle el flux d'aire que arriba al refredador de gas és major en el cas del R744 i també ho serà al condensador en el cas del R134a.

Els resultats obtinguts per tots dos són els següents:



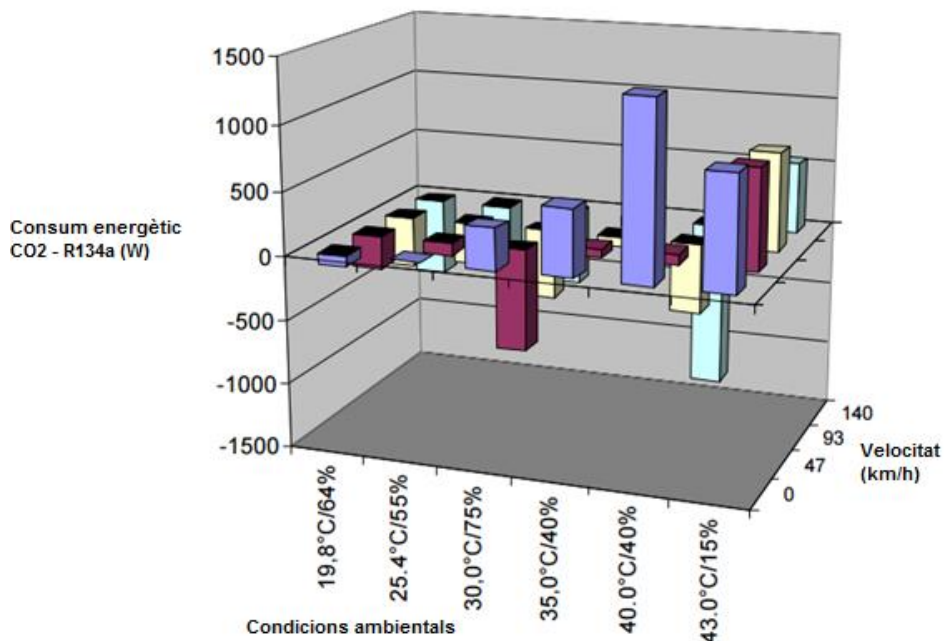
[21] Figura 23. Resultats d'un estudi del refrigerant R134A on s'analitza el consum energètic amb diferents condicions de velocitat del vehicle i ambientals



[21] Figura 24. Resultats d'un estudi del refrigerant R744 on s'analitza el consum energètic amb diferents condicions de velocitat del vehicle i ambientals

Per tal de poder comparar i analitzar correctament els resultats obtinguts es sobreposen les dues gràfiques de potència consumida pels diferents refrigerants.

El resultat de sobreposar les gràfiques és l'obtingut a la figura 25.



[21] Figura 25. Comparativa consum energètic entre el sistema de R744 i R134a

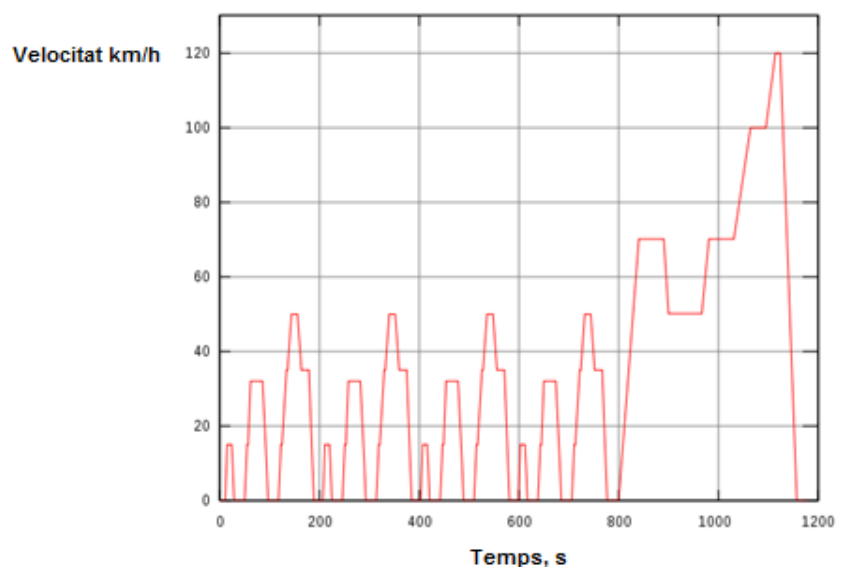
Gràcies a aquesta comparativa es pot afirmar que la potència consumida amb condicions d'entorn a temperatures menors a 25°C és una mica menor en el cas del sistema que empra R744 com a gas refrigerant i conseqüentment el seu COP és major.

Un cop sobrepassats els 25°C l'eficiència del sistema de refrigeració per CO<sub>2</sub> és molt dependent de la velocitat del vehicle i de la humitat relativa de l'entorn. A velocitats molt baixes, és a dir, pròximes a 0km/h, la potència consumida és notablement menor en el sistema de R134a. Això és degut al poc flux d'aire que arriba al refredador de gas del CO<sub>2</sub> cosa que fa baixar el rendiment.

A temperatures superiors a 25°C l'eficiència del sistema que utilitza CO<sub>2</sub> està directament vinculat amb la humitat de l'ambient ja que quan més alta és aquesta humitat més potència frigorífica s'aconsegueix. La velocitat del vehicle un cop supera els 50km/h no té cap efecte directe respecte a la potència consumida per aquest sistema tal i com es pot observar clarament a la figura 25.

Per finalitzar, si la temperatura es molt alta i la humitat relativa molt baixa la potència consumida pel sistema de CO<sub>2</sub> és molt major que no pas el sistema de R134a.

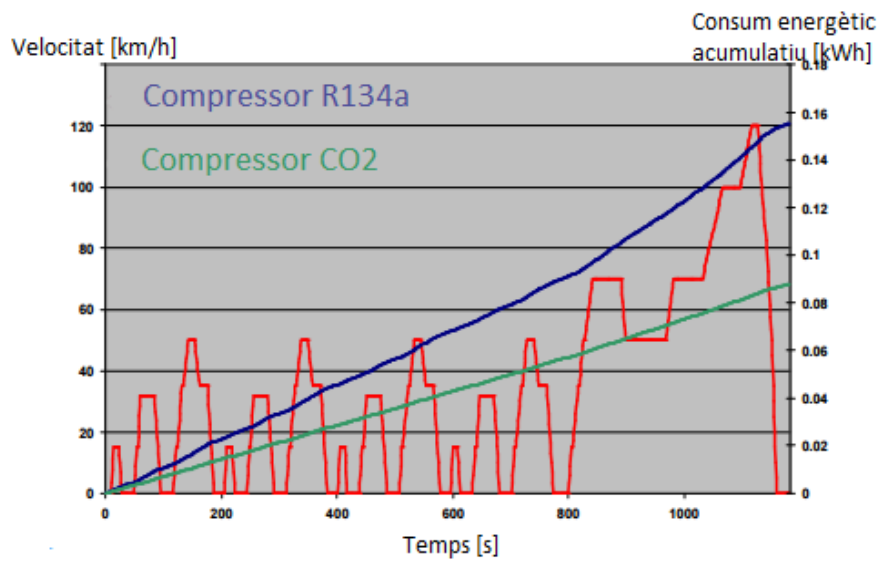
L'última prova realitzada pel grup Volkswagen és l'estudi de la potència consumida durant el New European Driving Cycle. Es tracta d'una prova dissenyada per avaluar l'impacte mediambiental dels vehicles i el protocol de prova segons la directiva europea 98/69/EC es compon de quatre cicles de circulació urbana amb múltiples parades i a continuació un cicle de conducció de carretera amb una velocitat màxima de 120km/h.



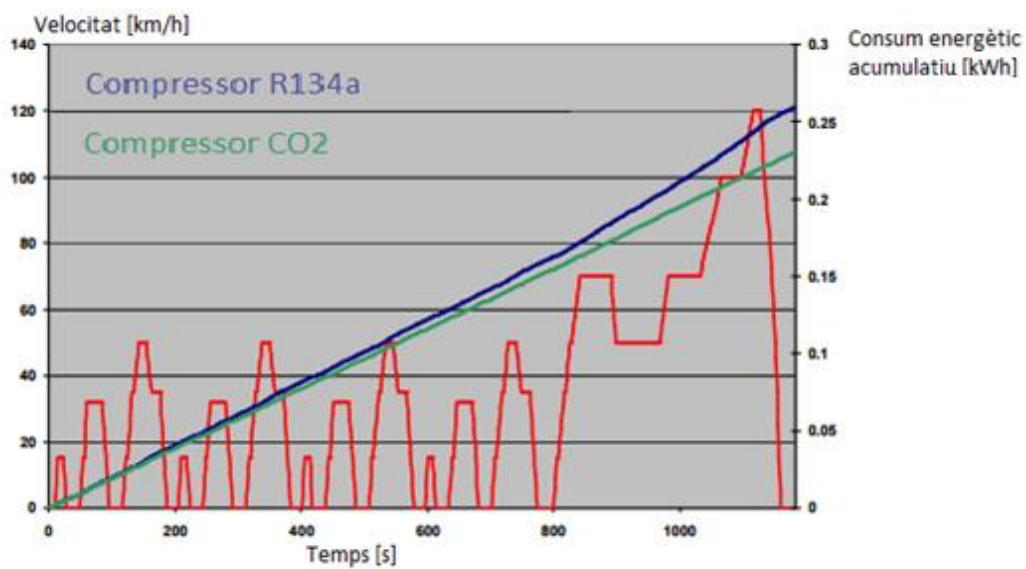
[21] Figura 26. New European Driving Cycle

Aquesta prova la qual dura 20 minuts s'ha realitzat amb diferents temperatures ambientals i diferents humitats.

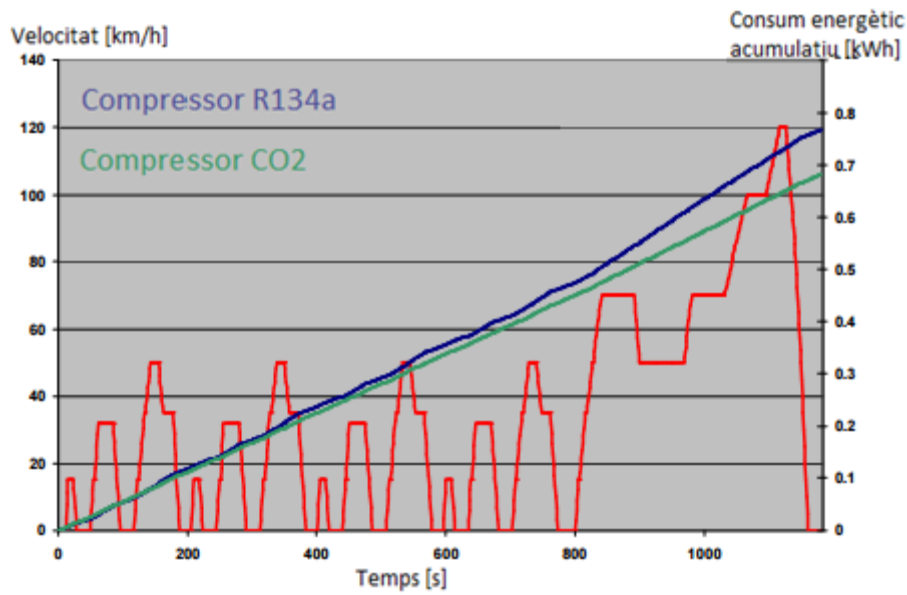
Els resultats que s'obtenen són els següents:



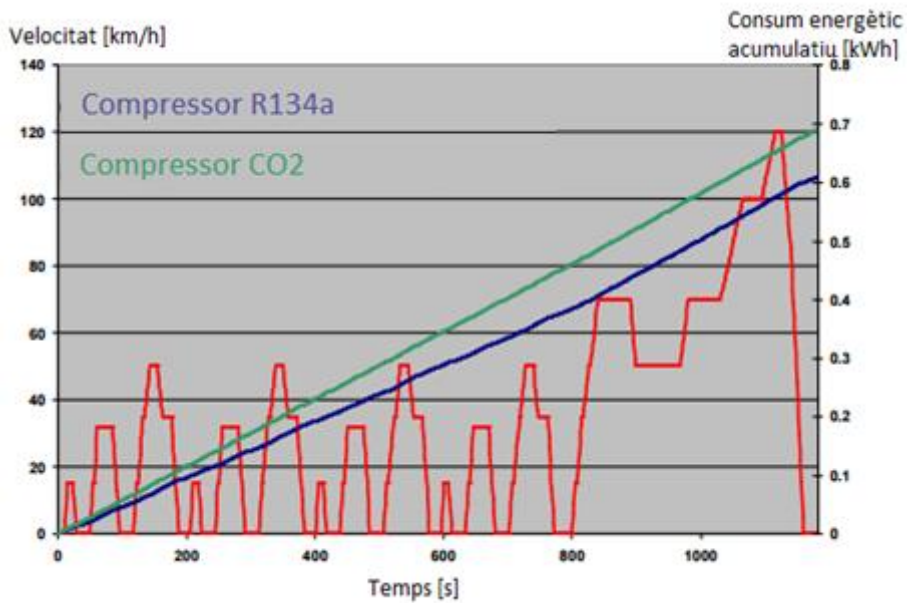
[21] Figura 27. Resultats del New European Driving Cycle a 19,8°C i 64% d'humitat relativa



[21] Figura 28. Resultats del New European Driving Cycle a 25,4°C i 55% d'humitat relativa

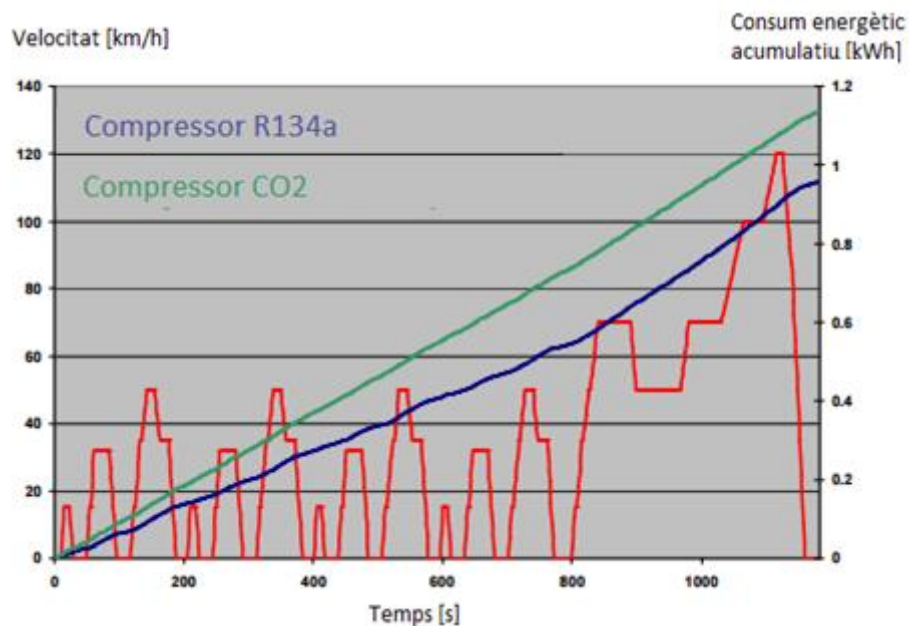


[21] Figura 29. Resultats del New European Driving Cycle a 30°C i 75% d'humitat relativa

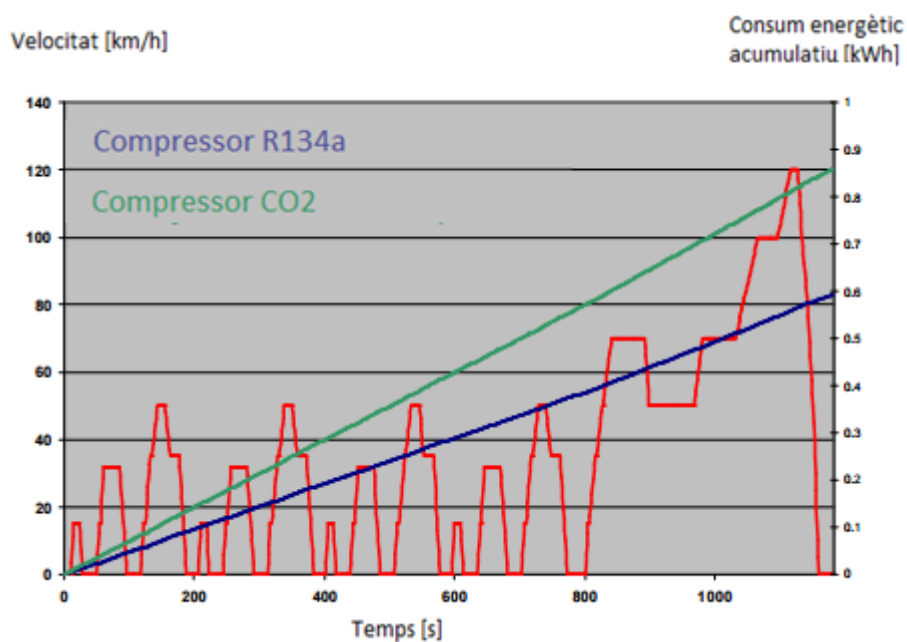


[21] Figura 30. Resultats del New European Driving Cycle a 35°C i 40% d'humitat relativa





[21] Figura 31. Resultats del New European Driving Cycle a 40°C i 40% d'humitat relativa



[21] Figura 32. Resultats del New European Driving Cycle a 43°C i 15% d'humitat relativa

Els resultats d'aquest estudi mostren que un sistema amb CO<sub>2</sub> en condicions reals de funcionament té bastant millor rendiment a baixes temperatures, és a dir, inferiors a 20°C. Un cop la temperatura de l'entorn és més elevada els rendiments de tot dos sistemes s'acosten i son força similars. A partir de 35°C el rendiment del sistema amb R744 comença a ser inferior respecte del de R134a segons augmenta la temperatura accentuant-se molt més aquesta inferioritat si la humitat relativa es baixa.

Les conclusions que es poden extreure d'aquesta última prova són que a mitges i baixes temperatures la transferència de calor del refredador de gas es més alta i per tant el consum de tot el sistema és més baix que no pas un que utilitzi R134a en les mateixes condicions d'entorn. Al incrementar-se aquesta temperatura ambient el funcionament del refredador de gas del sistema de CO<sub>2</sub> es menys eficient i la potència consumida augmenta notòriament.

### 6.2.1. Conclusions estudi comparatiu R744 i R134a

A la vista dels resultats dels diferents estudis realitzats pel grup Volkswagen sobre els sistemes de CO<sub>2</sub> en comparació amb el R134a es poden concloure dues idees bàsiques;

La primera és que la potència consumida de tots dos sistemes depenen directament de les condicions climàtiques, sent més adient utilitzar CO<sub>2</sub> amb temperatures baixes o mitges i R134a a mitges temperatures o altes. Per tant és recomanable utilitzar el gas R744 sempre i quan les previsions de les condicions de l'entorn no superin els 33-35°C i la humitat relativa sigui mitja o bé alta ja que la capacitat frigorífica amb aquestes humitats és alta. Per una altra banda si s'espera que les condicions ambientals incloguin altes temperatures en algunes èpoques de l'any la utilització del R134a es més viable.

La segona és que la velocitat del vehicle es un factor important a tenir en compte. Si el vehicle es troba parat a una temperatura mitja o alta i utilitza un sistema de R744 la potència consumida serà molt més alta que no pas amb R134a.

Si considerem que el CO<sub>2</sub> encara no està implementat a gairebé cap vehicle la inversió en I+D és un factor a considerar per les marques. En vehicles elèctrics venuts a països amb climes temperats i/o freds el seu menor consum pot ser un factor clau en la implementació gradual d'aquest refrigerant.



## 7. CARREGUES TÈRMiques D'UN VEHICLE

L'estudi i el càlcul de les càrregues tèrmiques és un dels temes que més problemes dona als enginyers encarregats en el disseny d'un vehicle. Això es deu al fet que els vehicles són comercialitzats arreu del món i a cada zona del planeta les condicions climàtiques són força diverses.

Aquest canvi de clima afecta especialment respecte a temperatures màximes i mínimes i les seves respectives humitats relatives de zones amb climatologies bastant extremes. Per començar és necessari saber que depenent de les condicions externes de temperatura i humitat l'eficiència dels equips climatitzadors que porti instal·lat el vehicle variarà així com aquesta eficiència també dependrà del fluid refrigerant circuli per la instal·lació. També aquestes condicions ambientals afecten a les càrregues sensibles en forma de radiació, de càrrega ambiental i de ventilació així com infiltracions. Un altre factor molt important que dificulta aquests càlculs són les inèrcies tèrmiques dels materials del vehicle ja que, per exemple, al moment d'encendre l'aire condicionat el interior del vehicle pot estar per sobre dels 50°C i a més tot i el funcionament de l'AC els materials emeten gradualment el calor absorbit anteriorment.

Per a un vehicle estàndard el càlcul es pot realitzar de moltes formes ja que existeixen multitud de models d'estimació de carrega tèrmica amb més o menys precisió i amb més o menys dificultat d'aplicació.

Segons ASHRAE hi ha varies metodologies principals pel càlcul de les càrregues tèrmiques, el mètode del balanç de calor (HBM), el mètode del factor de ponderació (WFM) i el mètode de càlcul de càrrega tèrmica CLTD. El HBM és el mètode més rigorós científicament parlant dels que hi ha disponibles, ja que s'hi consideren més detalls i s'hi fan menys suposicions. Un altre avantatge d'aquest mètode és que als càlculs s'hi poden afegir altres models fonamentals sobre tèrmica. Tot i que el mètode de balanç de calor es més precís i més rigorós el mètode del factor de ponderació i el CLTD són el més senzills d'utilitzar en casos de càrregues tèrmiques en vehicles de passatgers.

Prendre un o altre mètode dependrà principalment de la precisió que es vulgui aconseguir i sobretot de les dades disponibles sobre les càrregues i sobre els materials i mides del vehicle a l'hora de fer els càlculs. Si la informació disponible és suficient el mètode HBM és la millor opció.

Hi ha varietat de models per a l'estimació de les càrregues tèrmiques en vehicles. Per exemple, un d'ells és el desenvolupat pel doctor Yinhua Zheng i els seus companys, el qual, calcula les diferents càrregues per separat amb l'ajuda d'un túnel de vent. Els seus càlculs consideren la geometria del vehicle incloent les superfícies de vidre, el parabrises, l'angle del sostre i l'orientació del vehicle. Aquestes dades són necessàries ja que aquest mètode para atenció al càlcul de la radiació solar directa i difusa a través dels vidres i dels materials. Els guanys de calor considerats corresponen a les fonts habituals com poden ser ventilació i ocupació. La precisió d'aquest mètode prové de la utilització del túnel de vent.

Ja que els mètodes definits per l'ASHRAE són bastant generals s'hi solen fer algunes modificacions quan es vol estudiar el cas concret d'un vehicle, com el mètode definit anteriorment el qual havia desenvolupat un grup de científics liderats per Yinhua Zheng.

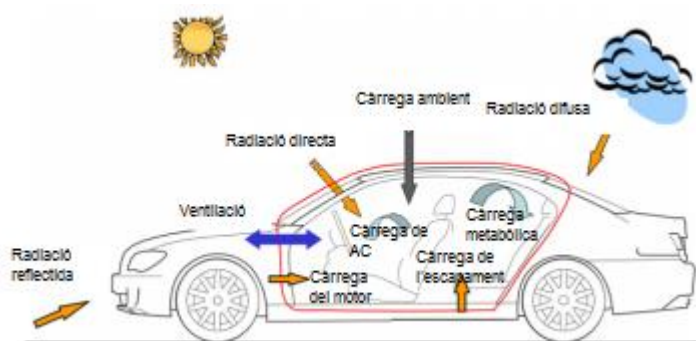
A continuació s'exposarà el mètode desenvolupat per professors de la universitat Simon Fraser University del Canadà el qual considera algunes càrregues tèrmiques no contemplades al mètode HBM de l'ASHRAE.

En els diferents mètodes que tracten vehicles es considera un model agrupat d'una cabina típica de un vehicle, en aquest cas també. Segons aquest mètode el guany net de calor a l'interior de la cabina en un cotxe estàndard es pot classificar en nou categories diferents. La càrrega total així com les càrregues que la formen poden ser positives en cas d'escalfament de la cabina o negatives en cas de refredament de la cabina i pot dependre també d'alguns paràmetres de conducció.

Ja que hi ha multitud de paràmetres diferents per al càlcul de les càrregues i tots els models existents estan basats en un casos generals en l'estudi de les càrregues tèrmiques d'un nou vehicle s'haurien de fer les modificacions i consideracions pertinents ja que hi haurien molts paràmetres variants.

Les càrregues tingudes en compte en un vehicle estàndard són les següents:

- Càrrega metabòlica
- Càrrega de radiació difusa
- Càrrega de radiació directa
- Càrrega de radiació reflectida
- Càrrega ambiental
- Càrrega del sistema d'escapament de gasos
- Càrrega del motor
- Càrrega de ventilació
- Càrrega generada per el sistema de A/C



[1] Figura 33. Càrregues a un vehicle

Totes aquestes càrregues es troben més visualment a la figura 33.

Entre les càrregues citades anteriorment hi han algunes que són molt dependents de les peces del vehicle que han de travessar i la resistència tèrmica que aquestes ofereixen mentre que d'altres són totalment independents dels elements de la cabina.

Totes les càrregues tèrmiques es calculen suposant un estat estacionari i durant un període de temps establert ja que les condicions no estacionaries d'un vehicle poden ser molt diverses. Generalment els càlculs de les càrregues es duen a terme independentment i posteriorment totes les càrregues calculades es sumen algebràicament.

A part del calor sensible, que és el mesurable amb els termòmetres estàndards també existeix un altre tipus de calor, anomenat calor latent. Aquest calor no afecta en un canvi de la temperatura mesurable de l'aire sinó que afecta en l'aigua continguda en aquest

ambient, és a dir, modifica la humitat d'aquest. La energia que contenen aquestes partícules d'aigua que conformen la humitat és absorbida per l'ambient sense variar la temperatura. L'evaporació i condensació de l'aigua existent a la zona mesurada requereix de canvis energètics que també s'han de considerar. Tot i ser important el calor latent només és aportada per les persones que es trobin dins de la zona estudiada degut a la seva respiració i sudoració i a la ventilació d'aquesta zona a partir d'aire exterior a ella amb condicions d'humitat i temperatura diferents. Aquesta càrrega només és considerada quan es vol saber la càrrega total de refrigeració, no es considera en calefacció.

Tot i que aquest és el procediment més habitual cal tenir en compte que en el cas dels vehicles elèctrics les càrregues són diferents. En concret es poden eliminar les càrregues aportades per el motor i per el sistema d'escapament de gasos.

Un cop es tenen les càrregues sumades ( $Q_{tot}$ ) es pot procedir a calcular el canvi de la temperatura de la cabina ( $\Delta T_i$ ). Això es calcula amb la següent expressió:

$$\Delta T_i = \frac{Q_{tot}}{m_a c_a + DTM} \Delta t$$

DTM és la suma de les inèrcies tèrmiques dels objectes presents a la cabina. Aquests objectes poden ser les estructures dels seients, el quadre de comandament i els seus elements ja que tots ells es troben a la zona calculada i per tant pertanyen al model utilitzat.  $\Delta t$  és la duració total del període de temps establert per al càlcul de les càrregues.  $m_a$  és la massa d'aire a l'interior de la cabina i  $c_a$  és el calor específic d'aquest aire.

També es calcula el canvi de temperatura de la superfície dels elements que componen la cabina durant el mateix període de temps establert.

Aquest càlcul es realitza mitjançant la següent expressió:

$$\Delta T_s = \frac{Q_s}{m_s c_s} \Delta t$$

En aquesta expressió  $m_s$  és la massa dels elements superficials afectats i  $c_s$  és el calor específic d'aquests elements.  $Q_s = Q_{s,rad} + Q_{s,amb}$  és el calor net guanyat per els elements superficials i consisteix per el calor guanyat per radiació i e calor obtingut de l'ambient.

Per finalitzar, dues càrregues habitualment trobades en els càlculs d'habitacions o construccions són la càrrega per il·luminació i per equipament, aquestes dues no seran contemplades a aquest treball ja que es considerarà que és poc probable trobar-les dins d'un vehicle privat.

## 7.1. Càrrega metabòlica

La activitat metabòlica del cos humà genera constantment calor i humitat. El calor travessa els teixits i finalment acaba a l'aire de la cabina. Per un altre banda la humitat es desprèn de la sudoració i l'exhalació d'aire durant la respiració i també acaba a l'aire ambient de l'interior de la cabina. Totes dues càrregues, sensibles i latents, componen l'anomenada càrrega metabòlica.

Aquesta càrrega es pot calcular de la següent forma:

$$Q_{Met} = \sum_{passatgers} M A_{Du}$$

M és el calor metabòlic produït per un passatger. Aquest calor pot tenir diversos valors segons l'activitat realitzada per la persona.

Generalment els ocupants d'un vehicle es consideren com a passatgers asseguts sense cap més activitat i un conductor. Els valors de calor metabòlica produïda per el conductor es considera com 85W/m<sup>2</sup> i el calor metabòlic de la resta de passatgers es considera 55W/m<sup>2</sup>.  $A_{Du}$  és l'àrea descrita per DuBois la qual es una estimació de l'àrea superficial d'un cos humà i és funció del pes i l'altura.

Aquesta àrea es calcula amb la següent expressió:

$$A_{Du} = 0.202 W^{0.425} H^{0.725}$$

On H es l'alçada del passatger i W el seu pes.

## 7.2. Càrrega per radiació

El calor guanyat a partir de la radiació solar és una de les parts més significants de la càrrega total que hi ha a un vehicle i és molt important tenir-la en consideració. Segons la ASHRAE el calor obtingut de la radiació solar es divideix en tres tipus, directa, difusa i reflectida. És molt important tenir-les en compte a l'hora de calcular el calor que travessa els vidres. En canvi al sostre, parets i terra es pot generalitzar utilitzant una sola expressió que utilitza un factor de correcció que ja contempla dades concretes de cada vehicle.

Aquestes radiacions es poden veure molt afectades pel color exterior i interior del vehicle provocant una diferència de temperatures a la superfície molt gran entre un vehicle d'un color i un altre vehicle igual però de diferent color.

El mètode CLTD s'utilitza per calcular el calor guanyat a través del sostre, parets i el terra. L'equació emprada per aquest mètode és:

$$Q = U \cdot A \cdot CLTD$$

CLTD és un valor tabulat depenent del dia i mes, la latitud i l'hora solar. A és la superfície i per últim U és el coeficient de transferència de calor. No obstant aquest valor s'ha de corregir amb un factor per la latitud i el mes (LM), el color de la superfície (K), dades que es poden trobar a l'ASHRAE, i també per la temperatura interior ( $t_i$ ) i exterior ( $t_m$ ) en graus Fahrenheit.

$$CLTD = (CLTD_1 + LM) \cdot K (78 - t_i)(t_m - 85)$$

La **radiació directa** és la part de la radiació solar incident que dona directament al cos del vehicle.

Aquesta radiació es calcula a partir de la següent expressió:

$$Q_{Dir} = \sum_{superficies} S \cdot \tau \cdot I_{Dir} \cos \theta$$

En aquesta expressió  $I_{Dir}$  és la radiació directa guanyada per unitat d'àrea i  $\theta$  és l'angle entre la superfície normal i la posició del Sol.  $\tau$  és la transmissivitat superficial i S és l'àrea superficial.

$I_{Dir}$  es calcula a partir de la següent formula:

$$I_{Dir} = \frac{A}{e^{\left(\frac{B}{\sin \beta}\right)}}$$

A i B són constants tabulades per la ASHRAE i són variants depenent del mes de l'any que es tracti.  $\beta$  és l'angle d'altitud i es calcula a partir de la posició i temps.

La **radiació difusa** forma part de la radiació solar però resulta de la radiació indirecta de la llum solar sobre la superfície del vehicle. Aquesta radiació té especial interès i importància durant els dies nuvolats ja que la major part de la càrrega per radiació és rebuda a partir d'aquest tipus.

La càrrega difusa es calcula així:

$$Q_{Dif} = \sum_{superficies} S \tau I_{Dif}$$

$I_{Dif}$  és la radiació difusa guanyada per unitat d'àrea i es calcula de la següent forma:

$$I_{Dif} = C I_{Dir} \frac{1 + \cos \Sigma}{2}$$

On  $\Sigma$  és l'angle d'inclinació de la superfície mesurada des de l'horitzontal de la superfície i C és un valor tabulat per la ASHRAE.

La **radiació reflectida** es refereix a la part de calor guanyada per la radiació reflectida pel terra que acaba incidint a la superfície del vehicle.

Aquesta radiació es troba a partir de:

$$Q_{Ref} = \sum_{superficies} S \tau I_{Ref}$$

$I_{Ref}$  és el calor guanyat de la radiació reflectida per unitat d'àrea. Es calcula:

$$I_{Ref} = (I_{Dir} + I_{Dif}) \rho_g \frac{1 - \cos \Sigma}{2}$$

On  $\rho_g$  és el coeficient de reflectivitat del terra.

Coneixent l'absortivitat de cada element superficial es pot calcular quanta de la radiació incident es absorbeix per cada superfície i per tant incrementar la seva temperatura superficial, dada la qual és necessària per conèixer el calor net guanyat per la superfície.

Aquest calor net absorbit pot ser expressat com:

$$Q_{s,rad} = S \alpha (I_{Dir} \cos \theta + I_{Dif} + I_{Ref})$$

On  $\alpha$  és l'absortivitat de la superfície.

Durant les hores nocturnes aquestes càrregues per radiació no es tenen en compte.

### 7.3. Càrrega ambient

La càrrega ambient es basa en la contribució tèrmica de l'ambient cap a l'interior de la cabina. Es a dir, es resultant de la diferència de temperatures entre l'aire exterior i l'interior. Aquesta transferència de calor es deu a la convecció de el calor de l'exterior i la seva conducció a través dels materials i també la convecció dels materials de l'interior de la cabina.

L'equació que defineix aquesta càrrega és aquesta:

$$Q_{amb} = \sum_{superficies} S U (T_s - T_i)$$

On  $U$  és el coeficient de transferència de calor de la superfície.  $T_s$  i  $T_i$  són les temperatures mitges de la superfície i de l'interior de la cabina respectivament.  $U$  es compon de diferents elements que consisteixen en les conveccions i conduccions a través de les superfícies.

$U$  s'expressa de la següent forma:

$$U = \frac{1}{R} \quad R = \frac{1}{h_o} + \frac{\lambda}{k} + \frac{1}{h_i}$$



R no és més que la resistència tèrmica per unitat d'àrea.  $h_o$  i  $h_i$  són els coeficients de convecció exterior i interior,  $k$  és la conductivitat tèrmica de la superfície i  $\lambda$  és l'espessor de l'element. Tot i saber a que correspon cada incògnita la conductivitat tèrmica i l'espessor són molt difícils de calcular. A més els coeficients de convecció depenen de la orientació del vehicle i de la velocitat de l'aire per tant també és difícil conèixer aquestes dades amb precisió. No obstant existeix una expressió per estimar el valor del coeficient de convecció en relació a la velocitat del vehicle:

$$h = 0.6 + 6.64\sqrt{V}$$

V es la velocitat del vehicle en m/s i la h resultant és el coeficient de convecció expressat en W/m<sup>2</sup>K.

Igual que passava amb la càrrega per radiació una part de la càrrega ambient és absorbida per els materials que componen el vehicle. El calor absorbit per cadascun d'aquests materials és la diferència entre el calor absorbit de l'ambient per la superfície i el calor cedit d'aquesta superfície a l'interior de la cabina.

Es pot expressar així:

$$Q_{s,rad} = SU(T_o - 2T_s + T_i)$$

To és la temperatura mitja ambient, Ti és la temperatura mitja de la cabina i per últim Ts és la temperatura mitja de la superfície.

## 7.4. Càrrega de ventilació

És necessari deixar que l'aire exterior entri dins de la cabina del vehicle per tal de mantenir la qualitat de l'aire ja que degut a la respiració i a la mida reduïda de la cabina l'acumulació de CO<sub>2</sub> és un risc. Tot i tenir el sistema de climatització sense funcionament es requereix un flux mínim d'aire per a mantenir el confort dels passatgers. Aquest flux necessari segons la normativa RITE és IDA3 que equival a 8dm<sup>3</sup>/s-persona.

Per una altre banda també cal saber que degut a que la cabina no està completament segellada i degut també a la velocitat del vehicle hi ha infiltracions d'aire.

Com a conseqüència de l'aire condicionat i de la ventilació la pressió a l'interior de la cabina és lleugerament superior a la pressió ambient i conseqüentment hi ha infiltracions. No obstant aquest intercanvi d'aire entre l'interior i l'exterior degut a les infiltracions estan permesos, contemplats i controlats durant el disseny degut a que ajuden parcialment a aconseguir el confort desitjat a l'interior del vehicle, ja que el moviment d'aire a la cabina aconsegueix aquest confort a més de controlar parcialment l'acumulació d'humitat. Aquest control ha de ser molt precís perquè aquestes infiltracions permeses poden afectar notablement en el rendiment de la climatització del vehicle.

Tot i que aquestes serien les condicions normals, com s'ha explicat anteriorment, les càrregues es calculen en règim estacionari per tant la pressió és constant. Per això, se suposa que l'aire que entra al vehicle degut a la ventilació entra a temperatura i humitat relativa ambientals. De la mateixa manera l'aire que surt de la cabina marxa a la mateixa velocitat de flux i surt amb les condicions de l'interior del vehicle.

D'acord amb els càlculs psicomètrics la càrrega per ventilació està composta per càrrega sensible i càrrega latent. Si es coneix el cabal d'aire de ventilació que entra al vehicle les càrregues poden ser calculades de la següent forma:

$$q_s = \frac{Q}{V_{esp} \cdot 3600} \cdot \Delta h_s$$

$$q_v = \frac{Q}{V_{esp} \cdot 3600} \cdot \Delta h_l$$

On  $q_s$  i  $q_v$  són la càrrega sensible i latent respectivament,  $V_{esp}$  és el volum específic,  $Q$  el cabal en  $m^3/h$ ,  $\Delta h_s$  és l'increment d'entalpia entre el punt interior desitjat i el punt auxiliar i  $\Delta h_l$  és l'increment d'entalpia entre el punt de la temperatura i humitat de ventilació i el punt auxiliar.

## 7.5. Càrregues del sistema d'escapament de gasos i motor

Ja que el projecte tracta sobre vehicles elèctrics aquestes càrregues són inexistents degut a que no existeix un motor de combustió ni un sistema d'escapament de gasos. No obstant en els casos d'estudi de cotxes híbrids si s'haurien de considerar.

## 7.6. Càrregues del sistema de climatització

El principal objectiu de la climatització és compensar la resta de càrregues tèrmiques per tal d'aconseguir unes condicions de confort per a les persones. Durant èpoques fredes es necessita un escalfament a l'interior del vehicle i per tant s'ha d'aportar una càrrega tèrmica positiva per aconseguir-ho. En canvi, en èpoques càlides o a zones amb aquest tipus de temperatura ambiental el que es necessita és aportar una càrrega tèrmica negativa per tal de refredar l'interior de la cabina.

Per tal de calcular la càrrega necessària quan la temperatura exterior és massa freda no es consideren les càrregues interiors i/o exteriors que poden aportar calor, com podria ser la càrrega metabòlica o qualsevol de les càrregues de radiació, això es fa així per tal de calcular les condicions més desfavorables.

En els casos on es calcula la càrrega de l'aire condicionat per refredar la cabina si s'han de considerar totes les càrregues que aporten calor. Per tant:

$$Q_{AC} = -(Q_{Met} + Q_{Dir} + Q_{Dif} + Q_{Ref} + Q_{Amb} + Q_{Vent}) - (m_a c_a + DTM)(T_i - T_{comf})/t_c$$

$T_{comf}$  és la temperatura que es vol tenir dins del vehicle i ve establerta per els estàndards de la ASHRAE. DTM, tal i com s'ha explicat a la equació X, és la suma de les inèrcies tèrmiques dels elements de l'interior del vehicle.  $m_a$  i  $c_a$  són massa i calor específica,  $t_c$  és una constant ve determinada per el temps requerit ( $t_p$ ) per a què la temperatura de la cabina arribi a la temperatura de confort. Per trobar aquesta constant s'utilitza:

$$t_c = \frac{t_p}{\ln|T_o - T_{comf}|}$$

On  $T_o$  és la temperatura inicial de la cabina.

Tot i que l'equació es pot fer servir com a guia per calcular la càrrega del aire condicionat d'un vehicle típic no és 100% precisa. És evident que el valor real d'aquesta càrrega dependrà de les dimensions i disseny del vehicle. A més la càrrega també depèn de la velocitat del compressor i del ventilador. Per tant calcular el consum d'energia real del cicle es força complicat i els resultats que es puguin obtenir seran només una aproximació.

## 8. ELEMENTS PRINCIPALS D'UNA INSTAL·LACIÓ

### 8.1. Evaporador

Els evaporadors emprats al món de l'automoció estan compostos per tubs i aletes soldades de coure o alumini que formen un serpentí. Aquest serpentí té com a funció aconseguir la major superfície de contacte amb l'aire que circula a través de l'evaporador. Aquests evaporadors poden tenir tancs a tot dos extrems o només a un d'ells. La diferència entre un evaporador amb només un tanc i un altre amb dos és que per a la mateixa àrea de flux d'aire l'evaporador amb un sol tanc té un rendiment major. Això és provocat perquè l'àrea de transferència de calor és major.

Habitualment contenen entre 4 i 6 passos de refrigerant. Inicialment el refrigerant entra a l'evaporador a través del tub d'entrada cap al tanc i es mou cap a baix pels canals del primer pas i a continuació ascendeix pel segon pas fins arribar al tanc, llavors torna a descendir pel pas 3 i finalment puja de nou pel pas 4 i surt en fase vapor per el tub de sortida.

Per conèixer quin evaporador és necessari instal·lar es combinen les necessitats del flux d'aire, el màxim consum admissible per al motor del ventilador i les restriccions de mida. Amb totes aquestes dades s'estableix la caiguda de pressió al costat de l'aire de l'evaporador. La caiguda de pressió al nucli es funció del disseny de la reixeta, l'àrea de la cara, la profunditat del nucli i la separació de les aletes.

Una de les situacions que més crida l'atenció dels sistemes d'aire condicionat als vehicles es que la temperatura de l'aire d'entrada a l'inici d'operació pot ser molt alta i arribar fins els 70°C. Aquesta temperatura disminueix ràpidament a mesura que el sistema de conductes del vehicle comença a ventilar-se. Els requisits de capacitat sota múltiples condicions han de ser considerats quan es dimensiona l'evaporador d'un cotxe incloent l'operació durant altes velocitats o baixes velocitats estables. Aquests requisits han de ser provats també en condicions de recirculació de l'aire de l'interior on la temperatura d'entrada i la humitat disminueixen progressivament alhora que ho fa la temperatura interior.

La càrrega de l'evaporador té també una part de calor lleugerament superior a la existent a l'ambient. Això es degut al guany de calor del vehicle i l'augment de temperatura a través del motor del ventilador.

Quan el període de funcionament és llarg la funció del sistema és refredar tot l'interior en comptes de produir un simple flux d'aire fred. Per tant l'objectiu a aconseguir és reduir el soroll i la velocitat de l'aire i així garantir el confort dels ocupants, per aconseguir-ho cal reduir el cabal d'aire impulsat però s'ha de procurar preservar la capacitat de refredament requerida.

Gestionar el vapor d'aigua que es condensa a l'evaporador és molt important en un vehicle. S'ha d'evitar que l'aigua condensada pugui arribar a l'interior de l'automòbil ja

que podria fer-lo malbé. A més si l'aigua condensada s'acumula a alguna zona del vehicle pot provocar l'aparició i propagació de bacteries.

Per tal de drenar correctament l'aigua condensada s'ha de procurar seguir aquests consells de disseny:

- Assegurar que la humitat condensada a l'evaporador es prou gran per a què amb una baixa velocitat i una sortida del nucli específica les gotes quedin atrapades per tensió superficial.
- Aconseguir una separació d'aletes suficient per facilitar el drenatge.
- Deixar espai suficient per acumular tota l'aigua provinent de la condensació al nucli durant un breu temps fins que el propi moviment del vehicle impulsi l'aigua cap a fora.
- Tenir suficient pendent al drenatge per aconseguir que l'aigua drenada flueixi.

També s'ha de considerar que els contaminants i les esquitxades durant la conducció poden taponar l'orifici de drenatge. Per tant cal procurar controlar periòdicament aquest orifici.

## 8.2. Ventiladors

El flux d'aire en un automòbil ha d'arribar tant als passatgers dels seients davanters com als del darrere en cas de que no disposin dels seus propis. El disseny del ventilador ha de ser adaptat a un espai reduït i ha de procurar aconseguir un equilibri idoni entre mida, pes, flux d'aire i eficiència. Gairebé tots els ventiladors utilitzats són de tipus centrífug amb un diàmetre màxim d'uns 200mm. La corrent que impulsa el ventilador es d'entre 14 i 25 A depenent de l'optimització i dels factors particulars del ventilador.

En la instal·lació del ventilador s'han d'analitzar les vibracions causades i on poden afectar i un cop analitzat fer tot el possible per eliminar-les o reduir-les el màxim possible.

Antigament el control de velocitat del ventilador depenia d'un accionament manual controlat pels ocupants el qual modificava la tensió que arribava al motor del ventilador. Actualment, excepte en alguns models de games baixes, aquesta velocitat sol estar controlada pel sistema climatitzador el qual conté gran quantitat de sensors que regulen constantment aquesta velocitat per tal d'aconseguir l'eficiència màxima i reduir el consum.

És necessari disposar d'un control compost per diverses vàlvules que dirigeixen l'aire cap als punts de sortida desitjats dins del vehicle. Aquest aire ha de ser distribuït de manera que es minimitzin les pèrdues de pressions i el guany de calor als conductes. Això no és fàcil ja que la canonada es mou per sota del tauler i pot adoptar formes complexes. Molt difícilment la sortida d'aire sigui simètrica entre la reixa del conductor i la del copilot ja que entre mig del ventilador i la sortida del conductor s'hi troben molts elements com el volant i altres instruments. Per tant s'habitua a utilitzar models de simulació informàtics per intentar aconseguir que totes les sortides tinguin cabals i velocitats similars.

### 8.3. Compressor

El tipus de compressor més emprat als automòbils és el de pistó. Els models d'aquest tipus de compressors que s'utilitzen als vehicles tenen les següents característiques:

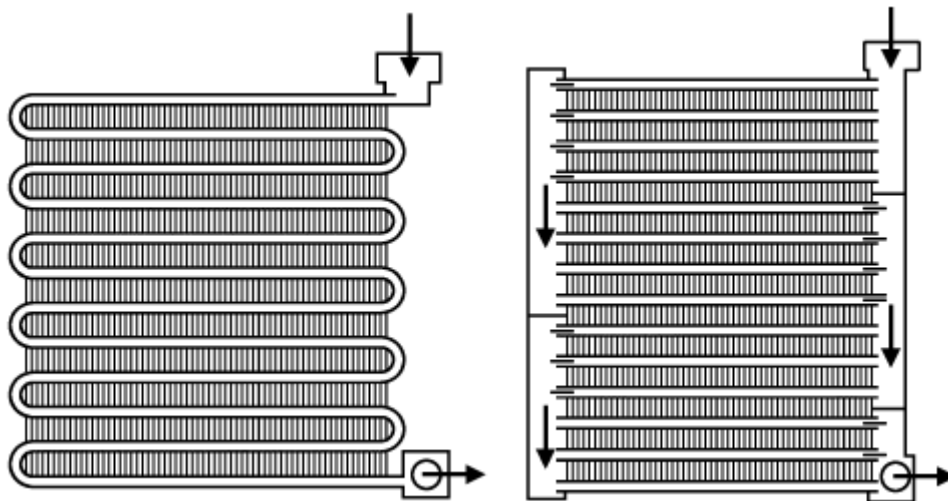
- Desplaçament: Els compressors amb desplaçament fix i solen moure's en un marge de entre 0,1 i 0,2 litres per revolució. En canvi els compressors de pistó de desplaçament variable tenen un desplaçament mínim d'aproximadament un 10% del seu desplaçament màxim que normalment és de 0,12 L/rev.
- Mida: L'estalvi de combustible i el poc espai disponible degut a tots els elements que hi ha sota el capó d'un cotxe provoca que l'espai per a instal·lar un compressor sigui petit.
- Rang de velocitat: En cotxes amb motor de combustió el compressor s'acciona mitjançant una corretja provinent del motor però en vehicles elèctrics normalment disposen d'un motor propi per accionar-ho. Aquesta disposició permet per exemple utilitzar l'aire condicionat amb el motor parat i/o mentre es carrega el cotxe.
- Parell: Minimitzar el parell màxim beneficia la unitat del compressor i el muntatge dels elements pròxims ja que es minimitzen les vibracions i els cops a les arrancades.
- Compressors de desplaçament variable: L'angle dels plats canvia com a resposta a la pressió d'aspiració i de descarrega per tal d'aconseguir una constant pressió d'aspiració just per sobre de la congelació independentment de la càrrega. Un sensor electrònic controla el flux de gas per tal de regular l'angle. Aquest tipus de compressors tenen un consum energètic menor ja que regulen la potència consumida. A més emeten menys soroll i vibracions, són més eficients i són més fiables.
- Muntatge: El correcte muntatge del compressor al vehicle minimitza les ressonàncies estructurals.
- Retorn d'olis: És molt important que no hi hagi cap lloc on el lubricant es pugui acumular. A més s'ha d'assegurar que la velocitat del refrigerant sigui prou alta per arrossegar el lubricant per tot el circuit fins tornar al compressor.

Els fabricants més importants de compressors per a vehicles són Valeo (antic Seltec), Sanden i EraBenelux.

### 8.4. Condensador

Els condensadors d'automoció poden tenir dos dissenys diferents. Un d'ells consta d'un serpenti d'alumini amb aletes soldades durant tot el recorregut. L'altre es compon d'un conjunt de tubs horitzontals amb aletes soldades que connecten uns dipòsits laterals. Aquesta disposició permet múltiples canals de flux (entre 6 i 12), són coneguts com condensadors de flux paral·lel. Els tubs que el componen tenen parets de 2mm de gruix i un diàmetre exterior d'entre 18 i 22mm.





[1] Figura 36. Condensador

Degut als múltiples canals de flux dels que disposa un condensador de flux paral·lel la seva pèrdua de càrrega és més petita que en un condensador amb serpentí.

Normalment en els condensadors de flux paral·lel cada passada té un nombre menor de tubs degut a que inicialment el volum específic del vapor sobreescalfat és molt gran. Això dona a lloc a vapor a altes velocitats dins dels tubs i provoca pèrdues de pressió molt altes. Per evitar-ho aquest flux s'ha de dividir en un gran nombre de tubs per tal de reduir la velocitat del gas i la pressió. Al llarg del condensador la temperatura arriba a ser la de saturació i s'inicia la condensació i la densitat comença a augmentar. A mesura que es condensa el vapor el refrigerant es converteix en líquid i la seva velocitat és molt més baixa i produeix caigudes de pressió més petites. Per tant el nombre de tubs de l'última passada ha de ser més petit que la de l'inicial.

El dimensionament del condensador és vital degut a que una mida insuficient redueix la seva capacitat de condensació a altes pressions i augmenta els requisits energètics del compressor. Per altre banda un condensador massa gran pot produir temperatures de condensació més baixes que la temperatura ambient, com el fluid circula a baixes velocitats degut a les grans dimensions del condensador li dona temps a escalfar-se per sobre de la temperatura de saturació abans de sortir del condensador i provocar que el fluid s'evapori a les línies de líquid. Per evitar-ho s'estableix una temperatura mínima de condensació entre 5 i 17 graus superior a la temperatura ambient. També es pot evitar afegint un ventilador al condensador. Quan arriba gas a la vàlvula d'expansió es pot detectar un soroll i pot produir danys greus.

S'ha de procurar que la caiguda de pressió al condensador sigui el més baixa possible per reduir el consum del compressor.

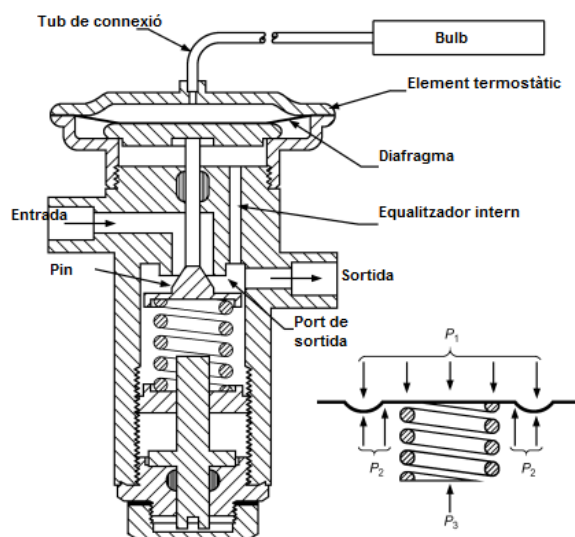
Els condensadors cobreixen tota la superfície del radiador del cotxe per evitar fuites d'aire.

## 8.5. Vàlvula d'expansió

### Vàlvula d'expansió termostàtica

Aquestes vàlvules controlen el flux de líquid refrigerant que arriba a l'evaporador en relació a la quantitat de vapor sobreescalfat que surt de l'evaporador. Serveix per garantir que l'evaporador funciona sense deixar sortir líquid refrigerant cap al compressor. Això s'aconsegueix controlant que el flux màssic de refrigerant que entra a l'evaporador pugui ser completament evaporat gràcies a el calor absorbida.

Ja que aquesta vàlvula està controlada per el vapor sobreescalfat s'ha d'assegurar que el evaporador sigui capaç de sobreescalfar el gas.



[1] Figura 37. Vàlvula d'expansió

A la figura 37 es mostra l'interior d'una vàlvula d'expansió termostàtica.

La pressió 1 ( $P_1$ ) és la pressió de l'element termostàtic que depèn de la càrrega i temperatura del bulb i és la que s'aplica a la part superior del diafragma i obre la vàlvula.

La pressió 2 ( $P_2$ ) és la pressió provinent de l'evaporador que travessa l'equalitzador intern i arriba a la part inferior del diafragma i actua en la direcció de tancament de la vàlvula.

La pressió 3 ( $P_3$ ) és la pressió equivalent de la força del sobreescalfament i actua també a la part inferior del diafragma en la direcció de tancament.

Aquestes pressions han d'estar igualades de la següent forma:  $P_1 = P_2 + P_3$ .

La capacitat de la vàlvula d'expansió depèn de la proporció líquid-gas que hi arriba. Si hi ha molt gas a l'entrada del fluid la capacitat de la vàlvula es redueix bastant degut a diversos aspectes:

- El cabal màssic de refrigerant que travessa la vàlvula disminueix degut a la menor densitat del refrigerant.
- El flux de vapor compressible provoca pressions més altes del habitual a la vàlvula d'expansió i restringeix el caudal en fase líquida que la travessa.
- El vapor que la pot travessar no proporciona cap efecte refrigerant i per tant redueix la capacitat total del sistema.

Si es detecta que la temperatura a l'entrada de la vàlvula no és prou freda per garantir que sigui tot líquid s'han d'instal·lar subrefredadors addicionals.

Existeixen diverses càrregues termostàtiques que controlen la vàlvula:

**Càrrega de gas:** Són càrregues líquides que utilitzen el mateix refrigerant a l'element termostàtic que al sistema de refrigeració que controla. La quantitat de càrrega està controlada de forma que a una temperatura predeterminada tots els líquids s'hagin evaporat i si es segueix augmentat la temperatura no augmenti massa més la pressió de l'element. Gràcies a la limitació de la pressió del seu element termostàtica la vàlvula serveix com a protecció de una sobrecàrrega al motor del compressor mitjançant la limitació de la pressió màxima d'operació. També ajuda a prevenir retorn de líquid quan arrenca el compressor.

**Càrrega de líquid:** En aquest cas també s'utilitza el mateix refrigerant que al sistema. Els volums que conté el bulb, el tub del bulb i la càmera del diafragma estan establerts de forma que el bulb conté una mica de líquid estigui a la temperatura que estigui. Per tant el bulb sempre controlarà el funcionament de la vàlvula.

La càrrega de líquid dona com a resultat l'augment del sobreescalfament a mesura que disminueix la temperatura de l'evaporador. Això provoca una limitació sobre la utilització d'aquest sistema de control amb temperatures altes d'evaporació.

**Càrrega de líquid transversal:** S'utilitza un líquid volàtil que es pot barrejar amb un gas no condensable a l'element termostàtic. Aquests fluids són diferents a l'emprat en el sistema. Les corbes de pressió-temperatura són més planes que no pas les explicades anteriorment. En conseqüència el seu sobreescalfament també és diferent i sol tenir unes característiques gairebé constants o que es desvien moderadament al variar la temperatura de l'evaporador. Aquest control es sol utilitzar en una gamma de temperatures a l'evaporador entre 4 i -18 graus per tant no és habitual en vehicles convencionals.

**Càrrega de gas transversal:** És una combinació de les característiques de la càrrega de gas i la de líquid transversal. Es fa servir una quantitat limitada de líquid aconseguint així una pressió màxima de funcionament. A més el líquid utilitzat es barreja amb un gas no condensable com nitrogen. Amb això s'aconsegueix unes característiques similars de sobreescalfament a les aconseguides amb la càrrega de líquid transversal i una pressió màxima de funcionament similar a la càrrega de gas convencional.

### Vàlvula d'expansió elèctrica

La utilització d'una vàlvula d'expansió elèctrica requereix de controladors i sensors de control.

**Vàlvules de motor calent:** Hi ha dos tipus de vàlvules d'aquest tipus, un d'ells consta d'un element metàl·lic que s'escalfa elèctricament fent que s'expandeixi, aquest element està vinculat mecànicament a un passador de la vàlvula fent que aquesta es mogui depenent de la temperatura que s'aplica al metall. El segon tipus consta d'un fluid volàtil contingut dins d'una cambra escalfada elèctricament de forma que aquesta temperatura

aplicada està regulada de forma electrònica. La pressió del fluid volàtil actua sobre un diafragma que regula la vàlvula.

**Vàlvula de control magnètic:** Aquest tipus de vàlvules estan controlades a partir d'un electroimant que actua sobre un solenoide que comprimeix una molla progressivament en funció de la força magnètica que rep. Això habitualment afecta mitjançant un passador a l'obertura de la vàlvula.

**Vàlvula de pols modulad ample:** És una vàlvula amb solenoide de tipus on/off amb funcions especials que li permeten funcionar com a vàlvula d'expansió amb una vida útil molt llarga. Tot i que la vàlvula només pot estar completament oberta o completament tancada pot operar dosificant a partir de polsos ràpids oberts/tancats. La durada de cada obertura o pols està regulat electrònicament per tal d'aconseguir la dosificació desitjada.

**Vàlvula de motor pas a pas:** Es tracta d'una vàlvula controlada per un motor de múltiples fases dissenyat per girar en fraccions de revolució en funció de les senyals o "passos" enviats pel controlador. Aquest controlador decideix el nombre de passos i pot oferir un control precís sobre la posició de la vàlvula. En aquesta aplicació (vàlvules d'expansió) aquests motors estan connectats a un cargol d'avanç que converteix el moviment del rotor en un moviment lineal adequat per moure el passador de la vàlvula.

## 9. CÀLCULS

A continuació es realitzaran una sèrie de càlculs en base a un model de cotxe específic en unes condicions concretes ben explicades mitjançant els procediments explicats a l'apartat 8 d'aquesta memòria que tracten sobre l'aplicació del mètode de càlcul CLTD i un conjunt d'hipòtesis amb l'objectiu de trobar el consum energètic del compressor del vehicle model amb la major exactitud que sigui possible dins de les limitacions evidents que suposen aquest tipus de casos.

### 9.1. Dades i hipòtesis

Per començar cal fer un recull de totes les dades que puguin fer falta durant els càlculs i que es tinguin disponibles i proposar un escenari adequat i realista.

L'estudi es realitzarà suposant que el vehicle es troba aparcant a Terrassa un dia solejat i per ser més exactes el 21 de juliol. S'escull aquest dia ja que pertany a l'època de l'any on les temperatures són més altes i la radiació solar té més grau d'importància, a més, es tracta d'un dia que es pot trobar a les taules d'ASHRAE el qual facilitarà l'obtenció de dades i els càlculs.

Terrassa es troba a una latitud de  $41^{\circ} 34,62'N$  i una longitud de  $2^{\circ} 0,98'E$ . Aquestes coordenades les podem aproximar a  $40^{\circ} N$  i  $0^{\circ} E$  per tal de trobar més fàcilment les dades a partir de les taules i facilitar també la cerca dels valors corresponents a la radiació solar com per exemple els angles d'incidència solar depenent de l'hora.

La temperatura ambient que considerarem és de  $35^{\circ}C$  amb una humitat relativa de 35%, les quals són dades que són bastant precises ja que es repeteixen bastant durant els mesos de juliol i la hora solar escollida és les 12.00 del mig dia, la qual és una de les hores més desfavorables del dia en el que a temes de climatització respecta ja que la incidència solar és molt alta comparada amb altres hores del dia i la temperatura ambient també ho sol ser.

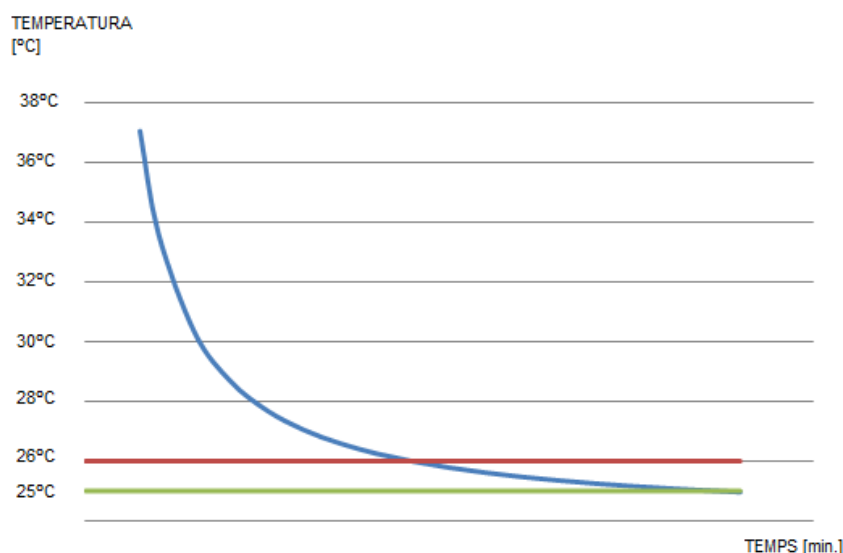
La temperatura desitjada a l'interior de la cabina serà de  $25^{\circ}C$  amb una humitat relativa del 50% que corresponen a valors recomanats per ASHRAE i molt habitual en càlculs d'instal·lacions de climatització.

Un altre dada molt important per dimensionar correctament el compressor corresponent és el temps en el qual es vol aconseguir arribar als  $25^{\circ}C$  desitjats partint de la temperatura interior a la qual es troba el vehicle. Cal considerar que a les 12.00 i després de que gairebé tota la superfície del vehicle hagi estat un llarg període de temps exposat a la radiació solar la temperatura de l'interior pot ser realment alta. Aquesta temperatura inicial pot superar fàcilment els  $50^{\circ}C$ .

L'objectiu de la climatització és aconseguir unes condicions ambientals desitjades en el menor temps possible però aquest objectiu és difícil d'aconseguir degut a l'alta precisió

necessària i l'alt consum energètic. Per posar un exemple, quan hi ha un aire condicionat instal·lat a una habitació i aquest es programa per a què l'habitació estigui a 24°C quan inicialment es troba a 35°C l'aparell començarà a funcionar a ple rendiment per tal de reduir la temperatura inicial. Al començament la velocitat a la qual es reduirà la temperatura de l'habitació serà bastant ràpida amb una relació graus/temps molt alta però aquesta relació s'anirà reduint a mesura que la temperatura interior sigui més pròxima als 24°C que es tenen com a objectiu. Com a conseqüència es podria trigar gairebé el mateix temps en baixar de 35°C a 25°C que en baixar de 25°C a 24°C.

Degut a que ajustar amb exactitud la temperatura interior del vehicle suposaria molt temps o un consum energètic molt alt i uns requeriments d'un gran compressor en cas de pretendre que aquest temps d'ajustament sigui baix suposarem que en el nostre estudi es trigarà aproximadament 15 minuts en arribar a uns 26°C el qual suposa 1 grau més del desitjat però que també s'aconseguirà reduir una estona després. Podem apreciar aquesta relació a la següent il·lustració.



[Elaboració pròpia] Figura 38. Evolució de la temperatura a l'interior del vehicle respecte el temps

La velocitat a la qual circula el vehicle també pot afavorir el refredament de la temperatura interior, especialment a l'inici ja que les temperatures dels materials que conformen el vehicle són força altes degut a la alta exposició a la radiació solar. Quan més alta sigui la velocitat la relació de velocitat entre la superfície exterior del cotxe i l'aire serà major i actuarà com un flux d'aire forçat, el qual afavoreix a l'intercanvi de calor i a que la superfície de la que parlem rebaixi la seva temperatura fins a la temperatura ambient reduint en part la inèrcia tèrmica cap a l'interior de la cabina.

Per altra banda, i de forma més notòria, la velocitat de circulació de l'aire per el condensador és el que més pot ajudar a aconseguir un alt rendiment frigorífic i a reduir una part del consum energètic i per tant la velocitat del vehicle permet arribar als objectius desitjats a l'interior de la cabina.

Tot i així la velocitat del vehicle cal establir-la com si fos de 0km/h ja que no seria correcte dimensionar tot el sistema amb condicions favorables quan també podem trobar que es



requereixi climatitzar la cabina quan el cotxe no està en moviment, com per exemple durant una retenció.

Un altre factor determinant són les infiltracions d'aire des de l'exterior, suposarem que la cabina està perfectament aïllada i no hi ha cap tipus d'infiltració des de l'exterior cap a l'interior que pugui perjudicar el sistema.

Per tal d'aconseguir les dades relacionades amb la incidència solar com per exemple l'angle d'incidència s'utilitza l'eina que es troba a una web científica [31] que facilita aquestes dades a partir d'un algoritme per calcular la posició solar.

Les dades introduïdes són les mencionades a l'inici d'aquest apartat:

### MIDC SPA Calculator

Compute the solar position from universal time  
and location using NREL's [Solar Position Algorithm \(SPA\)](#).

**Required input values:**

Enter start date: \_\_\_\_\_

Year:  Month:  Day:

Enter end date: \_\_\_\_\_

Year:  Month:  Day:

Enter output time interval: \_\_\_\_\_

Interval:  Units: ☐ Second ☒ Minute

**Enter site location information:**

40	Observer latitude (negative south of equator) [degrees]
0	Observer longitude (negative west of Greenwich) [degrees]
2	Observer time zone (negative west of Greenwich) [hours]
200	Observer elevation [meters]
1006	Annual average local pressure [millibars]
15	Annual average local temperature [degrees Celsius]

[31] Figura 38. Dades introduïdes a l'eina

Mitjançant aquesta web obtenim el següent output:

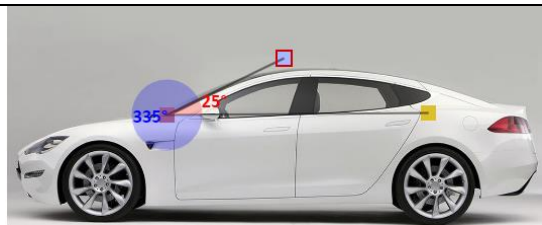
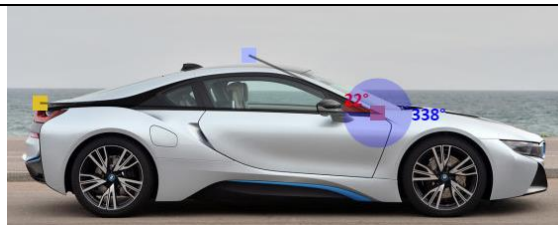
Data	Hora	Angle azimutal	Angle d'incidència superficial	Angle d'altitud
7/21/2017	10:00:00	91,349	55,537	34,463
7/21/2017	10:30:00	96,477	49,814	40,186
7/21/2017	11:00:00	102,175	44,152	45,848
7/21/2017	11:30:00	108,743	38,620	51,380
7/21/2017	12:00:00	116,626	33,323	56,677
7/21/2017	12:30:00	126,488	28,428	61,572
7/21/2017	13:00:00	139,226	24,211	65,789
7/21/2017	13:30:00	155,679	21,108	68,892
7/21/2017	14:00:00	175,525	19,670	70,330



[31] Taula 7. Resultats del 21 de juliol

Altres dades necessàries per els càlculs de la càrrega per radiació solar són la inclinació de les diferents superfícies respecte l'horitzontal (terra). És correcte assumir que la superfície per on més radiació entrarà a la cabina és el parabrises ja que suposa un gran % de la superfície total del vehicle i permet el pas de la radiació. Per tant la inclinació d'aquest element és determinant per l'estudi de les càrregues.

Degut a aquesta gran importància es farà una comparativa entre diferents tipus de vehicles per tal de tenir unes referències orientatives respecte a la inclinació respecte el terra dels seus parabrises. Conseqüentment es podran utilitzar els resultats d'aquest estudi de forma orientativa quan es vulgui saber com pot afectar el disseny del parabrises de qualsevol cotxe sobre la climatització d'aquest.

La comparació següent es sobre models híbrids o elèctrics, però no són massa diferents d'altres models de benzina o dièsel.

Berlina	Esportiu
Tesla Model S	BMW i8
	
25° Respecte l'horitzontal	22° Respecte l'horitzontal

Turisme	SUV
Nissan Leaf	Lexus NX 300h
	
30° Respecte l'horitzontal	29° Respecte l'horitzontal

Podem concloure que en general l'angle del parabrises respecte l'horitzontal és d'entre 20 i 30 graus en els models actuals, apropant-se més als 20 en models més esportius i més als 30 en models comuns d'us diari.

En el nostre estudi utilitzarem el model de Citroën C3 de l'any 2001 al 2010 com a model per els càlculs. En quant a mides es bastant similar al Nissan Leaf i comparteixen la inclinació del parabrises, es a dir, **30°**. El sostre es considerarà paral·lel al terra i la resta de finestres a 90° respecte l'horitzontal.

És **molt important** saber que en els càlculs de càrregues per radiació el  $\cos \theta$  és l'angle entre la normal de la superfície on incideix la radiació solar i la posició del Sol. Per tant si el parabrises es troba a 30° i l'angle d'incidència es de 33,323° respecte la normal de la superfície el  $\cos \theta$  equival al cosinus de 3,323 que és 0,9983.

S'han pres la resta de mesures d'aquest model ometent algunes curvatures i suposant que són elements plans i els resultats són els següents:

Element	Superfície (m <sup>2</sup> )
Parabrises	1.02
Porta dreta (davantera)	0.823
Porta esquerra (davantera)	0.823
Porta dreta (posterior)	0.508
Porta esquerra (posterior)	0.508
Maleter	0.5
Vidre portes davanteres (x2)	0.31
Vidre portes posteriors (x2)	0.279
Parabrises posterior	0.625
Sostre	1.632
Terra	3.44
Vidre lateral (x4)	0.0369

[Elaboració pròpia] Taula 8. Superfície de cada una de les parts del vehicle

Les mesures dels elements que contenen vidre són resultants de la superfície total menys la superfície del vidre que hi forma part.

Altres propietats que s'utilitzaran pels càlculs són les dels materials que componen la cabina. Principalment es basa en vidre laminat i parets compostes d'una capa d'alumini a l'exterior i una de plàstic interior. El gruix del vidre és d'uns 3mm i el de la resta de parets és bastant irregular però podem definir-lo com d'1cm per tal de facilitar els càlculs.

Les principals dades necessàries d'aquests materials són aquestes:

Propietats	Vidre	Parets del vehicle
Conductivitat (W/mK)	1,05	0,2
Densitat (kg/m <sup>3</sup> )	2500	1500
Transmissivitat	0,5	0
Absorvitivitat	0,3	0,4
Calor específic (J/kgK)	840	1000
Espressor (mm)	4	40

[Elaboració pròpia] Taula 9. Propietats tèrmiques de les parts del vehicle

Per altre banda les dades necessàries per als càlculs de càrregues durant l'hivern són moltes menys. Això es deu a que només es tindrà en compte les càrregues que treuen calor de l'interior de la cabina, no les que aporten. La majoria de càrregues que s'analitzen en aquest treball aporten calor per tant el càlcul de la càrrega per calefacció és de certa manera secundària.

No obstant s'han de realitzar els càlculs per veure si el total de les càrregues de calefacció és superior al total de les càrregues per refrigeració per tal de saber quina càrrega s'ha de prendre com a referència en el moment de dimensionar la instal·lació.

Per a aquests càlculs suposarem que és dia 21 de gener i hi ha una humitat relativa del 90% i una temperatura de 0°C per tal de simular un dels dies més freds d'hivern a Terrassa.

## 9.2. Càlcul de càrregues

En aquest apartat es seguiran els càlculs descrits a l'apartat 7 d'aquest document.

Per començar cal aplicar una correcció al factor CLTD trobat a les taules per ajustar-lo al cas d'estudi. En aquest cas el factor per el color de la superfície (K) serà 1 ja que es considera una superfície fosca. La temperatura interior serà de 25°C i la temperatura exterior de 35°C que equivalen a 77 i 95 graus Fahrenheit. Per últim el factor de correcció per la latitud i més ja que són 40° i al més de juliol serà de 0, tal i com podem trobar als annexos.

El valor CLTD serveix per calcular la càrrega total de parets, sostre i terra mentre que els vidres seran calculats a partir dels mètodes explicats a l'apartat 7.2. Es considerarà al vehicle com una casa totalment exposada a l'ambient ja que aquest mètode no existeix aplicat per a vehicles. També que l'oscil·lació diürna mitja és d'entre 9 i 14 graus.

Tenint en compte això, la CLTD del sostre i del terra és de 26 mentre que la de les parets depenen de l'orientació geogràfica. Suposem que el maleter és a la cara sud i cadascuna de les parets a est i oest. Per tant les CLTD corresponents són de 13 per les parets i 12 pel maleter.

$$CLTD = (CLTD_1 + LM) \cdot K (78 - t_i)(t_m - 85)$$

$$CLTD \text{ sostre i terra} = (26 + 0) \cdot 1 (78 - 77)(95 - 85) = 260$$

$$CLTD \text{ maleter} = (12 + 0) \cdot 1 (78 - 77)(95 - 85) = 120$$

$$CLTD \text{ parets} = (13 + 0) \cdot 1 (78 - 77)(95 - 85) = 130$$

Després de conèixer aquests valors podem seguir els càlculs de les càrregues per a aquestes parts.

$$Q = U \cdot A \cdot CLTD$$

Per trobar U cal saber primer la resistència R que, considerant la velocitat del vehicle igual a 0, es calcula a partir de l'espessor i la conductivitat tèrmica. També s'ha d'afegir la resistència de la capa d'aire exterior vertical i l'interior vertical que són 0,04 i 0,13m<sup>2</sup>K/W respectivament.

Com s'ha explicat anteriorment el coeficient de convecció es pot calcular a partir de  $h = 0.6 + 6.64\sqrt{V}$  sent V la velocitat del vehicle que es prendrà com a 0m/s.

$$U = \frac{1}{R} \quad R = \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h}$$

$$R = \frac{0,04m}{0,2W/mk} + 0,04m^2K/W + 0,13m^2K/W = 2,04m^2K/W$$

$$U = \frac{1}{2,04} = 0,49W/m^2K$$

Realitzant els càlculs obtenim que les Q corresponents són:

Element	Superfície (m <sup>2</sup> )	CLTD	Q(W)
Porta dreta (davantera)	0,823	130	52,425
Porta esquerra (davantera)	0,823	130	52,425
Porta dreta (posterior)	0,508	130	32,360
Porta esquerra (posterior)	0,508	130	32,360
Maleter	0,5	120	29,400
Sostre	2	260	207,917
Terra	3,44	260	438,256

[Elaboració pròpia] Taula 10. Càrregues obtingudes

### 9.2.1. Càrregues per radiació

Com ja s'ha explicat la càrrega per radiació es compon per 3 factors diferents que després s'han de sumar per saber la càrrega total per a cada element. A continuació es procedeix a calcular cadascun d'aquests factors per els vidres del vehicle ja que les parets, sostre i terra es calculen a partir del mètode CLTD que és més senzill per aquells elements. La raó de que el càlcul d'aquestes parts del vehicle siguin calculades a partir d'un mètode diferent al Glass Load Factor és per tal d'augmentar el màxim possible la precisió dels resultats i també per mostrar que hi ha diverses formes per realitzar càlculs similars més o menys complexes al món de la climatització.

La càrrega guanyada per radiació directa es calcula amb aquesta fórmula:

$$Q_{Dir} = \sum_{superficies} S \cdot U \cdot I_{Dir} \cos \theta$$

On:

$$I_{Dir} = \frac{A}{e^{\left(\frac{B}{\sin \beta}\right)}} = \frac{1085}{e^{\left(\frac{0.207}{\sin 56.67}\right)}} = 846.9W/m^2$$

Les dades per trobar  $I_{Dir}$  es troben a la taula dels annexos i l'angle  $\beta$  és l'angle d'altitud que és 56,677°.

Si calculem les  $Q_{dir}$  de cadascun dels elements trobem que:

Element	Superfície (m²)	Transmissivitat	$Q_{dir}$
Parabrises	1,02	0,5	431,185
Vidre portes davanteres (x2)	0,31	0,5	219,378
Vidre portes posteriors (x2)	0,279	0,5	197,440
Parabrises posterior	0,625	0,5	221,147
Vidre lateral (x4)	0,0369	0,5	52,226

[Elaboració pròpia] Taula 11. Càrregues directes obtingudes

Per tant, la  $Q_{dir}$  total és 1121,375W

El següent pas és calcular la radiació difusa ja que aquesta depèn de la directa i es calcula d'aquesta forma:

$$I_{Dif} = C I_{Dir} \frac{1 + \cos \Sigma}{2}$$

Segons les taules d'ASHRAE C és 0,136, la radiació directa l'hem calculat abans i equivalia a 846.9W/m² i el cosinus és el de l'angle d'inclinació de la superfície mesurada.



Ja que algunes superfícies tenen inclinacions diferents respecte d'altres s'ha de calcular la radiació difusa per a cada superfície i amb totes aquestes radiacions trobar la càrrega per radiació difusa fent un sumatori.

Les superfícies verticals, es a dir a  $90^\circ$  tenen cosinus igual a 0.

Si calculem totes les càrregues per radiació difusa trobem:

Element	Superfície (m <sup>2</sup> )	Transmissivitat	Idif	Qdif(W)
Parabrises	1,02	0,5	107,461	54,81
Vidre portes davanteres (x2)	0,31	0,5	57,589	8,93
Vidre portes posteriors (x2)	0,279	0,5	57,589	8,03
Parabrises posterior	0,625	0,5	57,589	18,00
Vidre lateral (x4)	0,0369	0,5	57,589	4,25

[Elaboració pròpia] Taula 12. Càrregues difuses obtingudes

La càrrega difusa total és 94,01W.

La última càrrega per radiació que ens falta per conèixer és la reflectida. Per trobar-la cal calcular primer la radiació reflectida pel terra que rep el vehicle. Aquesta té dependència directe de la difusa i la directa. Degut a que la difusa depèn de cada superfície tindrem una radiació reflectida a cada superfície que després haurà de ser emprada per trobar la càrrega per radiació reflectida de totes les superfícies i fer el sumatori pertinent.

Per a realitzar aquest càlcul cal conèixer també l'albedo del terra, que és la quantitat expressada en percentatge de la radiació que incideix sobre una superfície i és retornada, que en el nostre cas és asfalt gastat i equival a 0,12.

Element	Superfície (m <sup>2</sup> )	Transmissivitat	Iref	Qref(W)
Parabrises	1,02	0,5	106,850	54,494
Vidre portes davanteres (x2)	0,31	0,5	54,269	8,412
Vidre portes posteriors (x2)	0,279	0,5	54,269	7,571
Parabrises posterior	0,625	0,5	54,269	16,959
Vidre lateral (x4)	0,0369	0,5	54,269	4,005

[Elaboració pròpia] Taula 13. Càrregues reflectides obtingudes

Un cop calculades les radiacions reflectides per cada part i la càrrega corresponent es realitza el sumatori i el resultat és 91,44W.

Tot i que s'ha explicat que els materials de l'interior del vehicle també absorbeixen part de la radiació i la van alliberant quan s'està intentant refredar l'interior del vehicle fent necessari més refredament són factors molt complicats de calcular degut a que cada

material té una absortivitat diferent i les superfícies de cadascun d'aquests materials de l'interior del vehicle també és força complicat de calcular obviarem aquesta càrrega tant la guanyada per radiació com per ambiental i així es faciliten els càlculs.

### 9.2.2. Càrrega metabòlica

Com ja s'ha explicat aquesta càrrega depèn de l'alçada i pes de les persones al vehicle i de l'activitat que estan realitzant. Per trobar les condicions més desfavorables suposarem que hi ha 5 persones al cotxe, per tant va a la seva capacitat màxima.

El conductor despendrà una calor metabòlica sensible de  $85\text{W/m}^2$  i  $65\text{W}$  latents i el calor metabòlic de la resta de passatgers es considera  $55\text{W/m}^2$  sensibles i  $30\text{W}$  latents. Per saber la superfície en metres quadrats del cos dels passatgers es suposarà que tots ells mesuren  $1,75\text{m}$  i pesen  $80\text{kg}$ . A partir de la fórmula de DuBois resulta que l'àrea de cadascun dels passatgers és de  $1,95\text{m}^2$ .

Per tant la càrrega metabòlica sensible total serà:

$$65\text{W/m}^2 \cdot 1,95\text{m}^2 \cdot 4 + 85\text{W/m}^2 \cdot 1,95\text{m}^2 = 594,75\text{W}$$

Mentre que la càrrega latent serà de:

$$30\text{W} \cdot 4 + 65\text{W} = 185\text{W}$$

### 9.2.3. Càrrega ambient

En aquest cas només caldrà calcular la càrrega guanyada de l'ambient a través dels vidres ja que la resta d'elements ja han estat calculats amb el mètode CLTD.

Com ja s'ha explicat es pren la velocitat del vehicle com a  $0\text{m/s}$  per tant el coeficient de convecció és  $0,6\text{W/m}^2\text{K}$ .

$$R = \frac{1}{0,6} + \frac{0,004}{1,05} + 0,04 + 0,13 = 1,84\text{m}^2\text{K/W}$$

$$U = 0,54\text{W/m}^2\text{K}$$

Un cop sabem aquestes dades apliquem la fórmula per trobar la càrrega ambiental guanyada per cadascun dels vidres.

Element	Superfície ( $\text{m}^2$ )	$Q_{\text{amb}}(\text{W})$
Parabrises	1,02	5,508
Vidre portes davanteres (x2)	0,31	1,674
Vidre portes posteriors (x2)	0,279	1,5066
Parabrises posterior	0,625	3,375
Vidre lateral (x4)	0,0369	0,79704

[Elaboració pròpia] Taula 14. Càrregues a través dels vidres

La càrrega total dels vidres serà de  $12,86\text{W}$ .

#### 9.2.4. Càrrega de ventilació

Al suposar que hi ha 5 persones al cotxe i que el cabal de ventilació necessari per cadascun d'elles és de 8 dm<sup>3</sup>/s resulta que el cabal necessari total és de 40 dm<sup>3</sup>/s que és el mateix que 1440 m<sup>3</sup>/h.

Hem de trobar les condicions que busquem al diagrama psicomètric **[annex 45]** per tal d'omplir la següent taula:

	t(°C)	h%	Habs (g/kg)	Vesp(m <sup>3</sup> /kg)	Entalpia kJ/kg
Interior	25	50	10	0,857	50
Exterior	35	35	12,5	0,887	67,5
Mescla	31,5	40	11,5	0,877	61

[Elaboració pròpia] Taula 15. Condicions aire interior, exterior i mescla

Gràcies a aquestes dades resollem les equacions:

$$q_s = \frac{1440}{3600 \cdot 0.887} \cdot 11 = 4,96kW$$

$$q_l = \frac{1440}{3600 \cdot 0.887} \cdot 6,5 = 2,93kW$$

### 9.3. Càlcul total càrrega refrigeració

Un cop coneixem totes les càrregues s'ha de realitzar un sumatori de totes elles.

	Refrigeració	
	Càrrega sensible(W)	Càrrega latent(W)
Q Directa	1121,38	
Q Reflectida	91,44	
Q Difusa	94,01	
Q Metabòlica	594,75	185
Q Ambient	12,86	
Q CLTD parets sostre i terra	845,14	
Q ventilació	4960	2930
<b>TOTAL</b>	<b>7719,58</b>	<b>3115</b>

[Elaboració pròpia] Taula 16. Resultat càrregues pel cas de refrigeració

#### 9.4. Càrregues de calefacció

Durant aquest treball s'ha parlat força de les càrregues que s'han de combatre en la refrigeració d'un vehicle durant l'estiu ja que és on més càrregues afecten i per tant cal calcular. A més a més, la refrigeració ha estat l'únic aspecte de la climatització que ha

calgut prendre en compte en el disseny d'un nou vehicle ja que la potència del compressor afectava directament al consum de combustible d'aquest. Per altre banda la calefacció s'obtenia a partir de la pròpia calor residual dels motors de combustió interna com ja s'ha explicat anteriorment.

No obstant al tractar de l'estudi d'un vehicle elèctric el motor no pot ajudar massa o gens en la calefacció de la cabina així que aquesta energia s'haurà d'obtenir de les bateries, la qual cosa és aspecte molt important de disseny.

En els càlculs de calefacció es consideren les càrregues que extreuen calor de l'interior del vehicle i s'ignoren les que hi aporten que podrien ser per exemple la càrrega per radiació i la metabòlica.

#### 9.4.1. Càrrega de ventilació

Igual que en el càlcul d'aquesta mateixa càrrega per refrigeració es considera que hi ha 5 ocupants al vehicle així que el cabal necessari total és de 40dm<sup>3</sup>/s que és el mateix que 1440m<sup>3</sup>/h.

Hem d'utilitzar el diagrama psicomètric **[Annex 46]** per trobar les condicions interiors, exteriors i també les del punt de mescla. Aquest estudi sobre el diagrama es pot trobar als annexos.

Aquestes dades les podem observar a la següent taula:

Hivern	t(°C)	h%	Habs (g/kg)	Vesp(m <sup>3</sup> /kg)	Entalpia kJ/kg
Interior	21	50	7,5	0,845	41
Exterior	0	90	3,5	0,775	7,5
Mescla	15	60	6	0,825	30

[Elaboració pròpia] Taula 17. Condicions d'aire interior, exterior i mescla a l'hivern

Amb aquestes dades es pot resoldre l'equació:

$$q_s = \frac{1440}{3600 \cdot 0,775} \cdot 11 = 5,68kW$$

Ja que les càrregues latents no es consideren en el càlcul de la calefacció no cal calcular-la.

### 9.4.2. Càrrega tancaments

En el cas dels vidres els materials són els mateixos que en l'estudi anterior [10.2.3] així que la R i la U seran les mateixes.

$$R = \frac{1}{0.6} + \frac{0.004}{1.05} + 0.04 + 0.13 = 1.84 m^2 K/W$$

$$U = 1/R = 0.54 W/m^2 K$$

Un cop sabem aquestes dades apliquem la formula per trobar la càrrega ambiental perduda per cadascun dels vidres.

Element	Superfície (m <sup>2</sup> )	Qamb(W)
Parabrises	1,02	11,5668
Vidre portes davanteres (x2)	0,31	3,5154
Vidre portes posteriors (x2)	0,279	3,16386
Parabrises posterior	0,625	7,0875
Vidre lateral (x4)	0,0369	1,673784

[Elaboració pròpia] Taula 18. Càrregues ambiental que es perd a través dels vidres

La càrrega total perduda a través dels vidres del cotxe és de 27W.

En el cas de les parets, sostre i terra no es podrà calcular mitjançant el mètode CLTD ja que aquest és utilitzat només en el càlcul de refrigeració. Per tant el mètode a utilitzar serà el mateix que l'emprat per els vidres.

$$Q = \sum_{superfícies} SU(T_s - T_i)$$

La R i la U si són les mateixes així que:

$$R = \frac{0,04m}{0,2W/mk} + 0,04m^2K/W + 0,13m^2K/W = 2.04m^2K/W$$

$$U = \frac{1}{2,04} = 0.49W/m^2K$$

Element	Superfície (m <sup>2</sup> )	Q tancament (W)
Porta dreta (davantera)	0,823	8,468
Porta esquerra (davantera)	0,823	8,468
Porta dreta (posterior)	0,508	5,227
Porta esquerra (posterior)	0,508	5,227
Maleter	0,5	5,145
Sostre	2	16,793
Terra	3,44	35,397

[Elaboració pròpia] Taula 19. Càrregues perdudes a través dels tancaments

La càrrega total perduda a través de parets, sostre i terra del cotxe és de 84,73W.

## 9.5. Comparativa càrrega refrigeració i calefacció

	Refrigeració		Calefacció
	Càrrega sensible(W)	Càrrega latent(W)	Càrrega sensible (W)
<b>Q Directa</b>	1121,38		
<b>Q Reflectida</b>	91,44		
<b>Q Difusa</b>	94,01		
<b>Q Metabòlica</b>	594,75	185	
<b>Q Ambient</b>	12,86		111,73
<b>Q CLTD parets sostre i terra</b>	845,14		
<b>Q ventilació</b>	4960	2930	5680
<b>TOTAL</b>	<b>7719,58</b>	<b>3115</b>	<b>5791,73</b>

[Elaboració pròpia] Taula 20. Càrregues totals d'hivern i estiu

A l'anterior taula es pot observar que les càrregues de refrigeració són notablement superiors a les càrregues de calefacció per tant a l'hora de dimensionar un equip climatitzador s'haurà de fer tenint com a referència la refrigeració ja que si és capaç de combatre les càrregues de refrigeració ho serà també per la calefacció.

Aquests resultats eren d'esperar ja que un vehicle no destaca com a una estructura aïllada dels elements exteriors i sobretot a la radiació solar. Aquest aïllament al sol seria perillós per al conductor i altres ocupants ja que significaria reduir també el camp de visió. Per tant aquests factors s'han d'acceptar i hi ha poques alternatives on tractar de reduir les càrregues tèrmiques sense influir en la seguretat, element principal i més important de qualsevol cotxe.



La potència frigorífica que requerirem al vehicle serà de 7719,58W per el calor sensible i 3115W pel latent, en total 10,83kW. S'arrodoneix a 11kW per facilitar el disseny del sistema.

## 10. DIMENSIONAMENT DE L'EQUIP

Hem de tenir en compte que per tenir una transferència de calor raonable, cal mantenir una diferència de temperatures d'entre 5 i 10°C entre el medi i el refrigerant en canvi de fase. Això és, si es vol mantenir l'ambient a 25°C, la temperatura de canvi de fase del refrigerant a l'evaporador s'ha de mantenir sobre els 15-20°C, mentre absorbeix calor. La pressió més baixa en un cicle de refrigeració es troba a l'evaporador i aquesta pressió s'ha de mantenir per sobre de l'atmosfèrica per tal d'evitar qualsevol filtració d'aire dins del sistema de refrigeració, cosa que resultaria fatal pel sistema. En aquest cas en particular convé mantenir una pressió superior a 1 atmosfera quan es troba a 15°C.

Hem de recordar que és molt important evitar que arribi líquid al compressor per evitar qualsevol dany i assegurar així una llarga vida útil al aire condicionat del nostre cotxe. Per assegurar que entri líquid al compressor es sobreescalfa lleugerament el refrigerant per aconseguir així que el seu estat sigui 100% vapor. En aquest cas suposarem un sobreescalfament de 5°C per tant la temperatura d'entrada al compressor serà de 20°C i s'aconseguirà a partir del evaporador.

L'objectiu es dimensionar un equip que funcioni amb CO<sub>2</sub> i un amb R1234yf per tant s'ha de ser conscient que la comparativa requerirà de condicions diferents degut a que els sistemes amb CO<sub>2</sub> són sistemes transcrítics i en canvi el sistema de R1234yf és subcrític.

Com ja s'ha explicat les pressions del sistema de CO<sub>2</sub> seran més altes i això suposa una limitació. Per tant per la principal diferència es que en el cas del R744 establim la pressió del condensador mentre que al sistema del R1234yf establim la temperatura d'estudi.

La pressió escollida al condensador per el CO<sub>2</sub> és de 9MPa que equival a una temperatura de sortida del condensador de 40°C. La temperatura triada per el condensador en el cas del R1234yf és de 60°C que equival en condicions de líquid saturat a 1,64MPa. Veiem amb aquestes dades la gran diferència de pressions entre tots dos sistemes.

En el cas del R1234yf cal que es produeix un subrefredament al condensador per tal de reduir l'entalpia, augmentar l'efecte refrigerant i evitar que arribi vapor a la vàlvula d'expansió. Aquest subrefredament s'ha establert també com de 5°C i s'aconsegueix a partir de les pèrdues de calor durant el circuit i amb l'ajut del condensador.

En canvi amb el sistema de R744 s'empra un bescanviador de calor que subrefreda el refrigerant abans d'arribar a la vàlvula d'expansió i el sobreescalfa abans d'arribar al compressor mitjançant un intercanvi tèrmic entre ells. A més hi ha una pèrdua de pressió al bescanviador com és habitual en aquest tipus de peces que ajuda en el procés.

Per tal de calcular el treball requerit al compressor, el cabal màssic de refrigerant, el COP del sistema i la relació de compressió del compressor s'empraran les taules de les propietats termodinàmiques del R1234yf i del R744 per trobar temperatures, pressions, entalpies i entropies de saturació. També serà requerit el diagrama PH d'aquests refrigerants per acabar de trobar totes les dades que facin falta.

### 10.1. Sistema amb R1234yf

Aquestes són les dades resultants del sistema que funciona amb R1234yf en les condicions descrites anteriorment:

Punt	P(Mpa)	T(°C)	h(kJ/kg)	s(kJ/K·kg)
1	0,51	15	372,8	1,601
2	0,51	20	379	1,625
3	1,64	65	402	1,625
4	1,64	60	285,5	1,278
5	1,64	55	278	1,25
6	0,51	15	278	1,26

[Elaboració pròpia] Taula 22. Punts del sistema amb R1234yf

El procediment per trobar-los és el següent:

- Les dades del punt 1 equivalen al punt de vapor saturat a 15°C, les podem trobar a les taules de propietats termodinàmiques del refrigerant.
- El punt 2 consta de desplaçar horitzontalment fins coincidir amb la línia que descriu els 20°C als que s'arriba gràcies al sobreescalfament. Aquest sobreescalfament hauria de comportar un lleuger increment de pressió però no el considerarem per tal de facilitar els càlculs i l'ús.
- A partir de l'entropia del punt 2 seguim la línia per mantenir-nos amb un valor constant fins arribar a la pressió del punt 3. Aquesta pressió serà la mateixa que la del punt 4 i es determina mitjançant les taules buscant la temperatura de 60°C a líquid saturat. Quan trobem el punt 3 busquem tots els valors d'aquest punt per omplir la taula.
- Al punt anterior ja s'explica com determinar el punt 4. A partir d'aquest punt escrivim les dades a la taula i restem 5°C(horitzontalment de nou) degut al subrefredament. Al restar-los i mantenir la mateixa pressió (per ser precisos hauria de reduir-se) trobem el punt 5 i totes les seves dades.
- Per finalitzar tracem una línia vertical des del punt 5 fins arribar a la pressió equivalent al punt 1 i 2. On es troben aquestes línies serà el punt 6 i tindrem tota la taula llesta.

A continuació s'ha de trobar el cabal màssic de refrigerant amb aquesta expressió:

$$\dot{m} = \frac{Q_f}{(h_2 - h_6)} = \frac{11kW}{(379 - 278)} = 0,116kg/s$$

Amb el caudal màssic podem saber la potència requerida pel compressor:

$$W_c = \dot{m}(h_3 - h_2) = 0,116 \cdot (402 - 379) = 3,388kW$$

Trobem el COP:

$$\text{COP} = \frac{Q_f}{W_c} = \frac{11\text{kW}}{3,388\text{kW}} = 3,25$$

Per últim si es vol saber la relació de compressió s'ha de dividir la pressió a la sortida del compressor per la pressió a l'entrada:

$$r_c = \frac{P_{\text{compressor}}}{P_{\text{evaporador}}} = \frac{1604\text{kPa}}{510\text{kPa}} = 3,22$$

Amb aquestes dades es pot buscar als catàlegs un compressor que ofereixi una potència frigorífica i una potència requerida similars.

Per suposat és complicat o gairebé impossible trobar un compressor amb les condicions exactes que requerim per tant cal ser una mica flexible en els paràmetres determinants i trobar un que sigui ho més similar possible.

A l'apartat [9.7.3] ja s'expliquen quins són alguns dels fabricants més importants de compressors per a vehicles. D'entre aquells s'escull **Valeo** (antic Seltec) ja que disposa d'una web molt pràctica per a buscar el compressor ideal segons les característiques del teu sistema. Un factor a tenir en compte d'aquest buscador es que suposa que el refrigerant és R134a però com les seves característiques són molt similars al R1234yf els resultats es consideren vàlids.

L'eina que ofereix la pàgina de **Valeo** demana les dades de temperatura de condensació, d'evaporació, el subrefredament i sobreescalfament i les revolucions per minut com podem veure a la imatge. Posarem 800rpm perquè són les revolucions habituals en cotxes amb motor de combustió interna quan no estan en moviment i es suposa que es poden aconseguir les mateixes revolucions al compressor si s'acciona amb un motor elèctric quan el cotxe està parat. Tot i que es cert que segur que es poden aconseguir moltes més revolucions però probablement el consum energètic d'aquest motor elèctric sigui superior i es vol evitar.

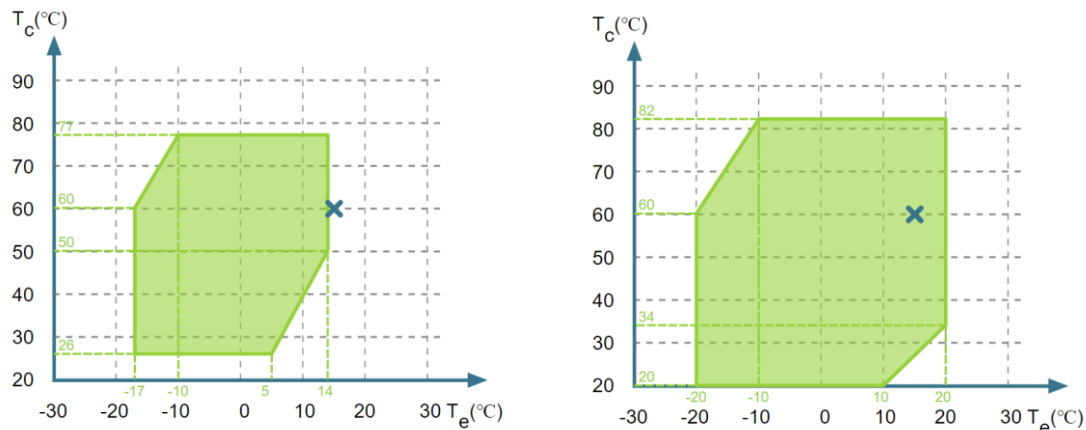
Les dades que demana aquesta eina i els valors que se li donen són:

- Capacitat frigorífica = 11kW
- Temperatura de subrefredament = 5°C
- Temperatura de sobreescalfament = 5°C
- Temperatura de condensació = 60°C
- Temperatura d'evaporació = 15°C
- Velocitat del compressor = 800rpm

Els resultats que ens ofereix a partir d'aquestes dades són els de dos compressors diferents:

	TM31	TM43
Capacitat frigorífica (kW)	11,2	15,4
Potència (kW)	2,69	4
COP	4,16	3,85
Capacitat de condensació (kW)	14,17	19,79
Flux màssic (kg/h)	298,6	429,29

[Elaboració pròpia] Taula 23. Característiques dels compressors sota aquests paràmetres



[25] Figura 39. Gràfiques Tc-Te dels compressors recomanats

El principal problema del model TM31 és que no està dissenyat per treballar amb temperatures d'evaporació de 15°C sinó que com a màxim 14°C. Aquesta petita diferència es podria ignorar.

En el cas del model TM43 si que compleix totes les característiques necessàries però la capacitat frigorífica pot ser massa elevada per les necessitats reals i per tant també el consum elèctric del compressor, que és un dels aspectes més importants en la decisió d'aquest element en un cotxe elèctric on cada kW de consum conta.

Per tant s'escull el TM31 tot i que potser cal reajustar mínimament la temperatura d'evaporació. Considerant que s'ha calculat per tal d'utilitzar l'aire condicionat a 25°C quan existeixen possibilitats reals en que els usuaris escullin temperatures una mica inferiors.

Un factor a tenir en compte d'aquest compressor es que es tracta d'un compressor utilitzat per vehicles amb motor d'explosió per tant el seu accionament és mecànic. Això implica que cal un motor que l'alimenti, en el cas dels cotxes amb motor de combustió interna aquest accionament s'aconsegueix a partir del propi motor ja que tot i que el vehicle estigui parat el motor segueix al ralenti. En el nostre cas d'estudi es pot adherir un motor elèctric que l'alimenti, necessari especialment quan està el cotxe parat. És necessari aquest motor elèctric propi pel compressor per tal de garantir treballar en un rang de rpm determinat que sigui adient per fer funcionar el sistema però que no consumeixi molta energia.

En el que a l'evaporador respecta solen ser models bastant estàndards per a diferents vehicles de la mateixa mida per tant l'ideal per a aquest cas és buscar l'evaporador que utilitzi un cotxe de dimensions similars. L'evaporador escollit és de la marca Delphi i disposa d'una malla d'alumini de 200x240x60mm que és el mateix que utilitza el Citroën C3.

Per a escollir el condensador el procediment és el mateix. Es busca en pàgines webs de recanvi de peces els condensadors utilitzats per models similars. En aquest cas s'escull un condensador de 540x485x16mm de la marca MagnettiMarelli.

Per últim per trobar una vàlvula d'expansió adequada es busca la pròpia vàlvula que utilitza el Citroën C3 estudiat de la marca Dasis.

## 10.2. Sistema amb CO<sub>2</sub>

Les dades trobades per el sistema amb R744 i les condicions descrites a l'apartat 11 són les següents:

	P(Mpa)	T(°C)	h(kJ/kg)	s(kJ/K-kg)
1	5,087	15	416,64	1,7489
2	5,087	20	430	1,79
3	9	64	450	1,79
4	9	40	344	1,46
5	8	35	344	1,46
6	5,087	15	344	1,47

[Elaboració pròpia] Taula 24. Punts del sistema amb R744

El procediment per trobar-les ha estat els següent:

- Les dades del punt 1 equivalen al punt de vapor saturat a 15°C, les podem trobar a les taules de propietats termodinàmiques del refrigerant.
- El punt 2 consta de desplaçar horitzontalment fins coincidir amb la línia que descriu els 20°C als que s'arriba gràcies al sobreescalfament. Aquest sobreescalfament hauria de comportar un lleuger increment de pressió però no el considerarem per tal de facilitar els càlculs i l'ús de la gràfica.
- A partir de l'entropia del punt 2 seguim la línia per mantenir-nos amb un valor constant fins arribar a la pressió del punt 3, es a dir 9MPa. Aquesta pressió serà la mateixa que la del punt 4, i per trobar aquest quart punt cal trobar on talla la corba de 40°C de temperatura amb la pressió de 9MPa.
- Al punt anterior ja s'explica com determinar el punt 4. A partir d'aquest punt escrivim les dades a la taula i restem 5°C verticalment, fent això trobarem que aquests 5 graus menys (35°C) tallen amb la línia de 8MPa de pressió, que es la pèrdua de pressió resultant del bescanviador de calor. Amb aquest procediment trobem el punt 5 i totes les seves dades.
- Per finalitzar baixem horitzontalment fins a la pressió inicial per trobar el punt final 6 i les dades que li corresponen.



A continuació s'ha de trobar el cabal màssic de refrigerant un cop més aquesta expressió:

$$m = \frac{Qf}{(h2 - h6)} = \frac{11kW}{(430 - 344)} = 0,128kg/s$$

Amb el caudal màssic podem saber la potència requerida pel compressor:

$$Wc = m(h3 - h2) = 0,128 \cdot (450 - 379) = 9,088kW$$

Troblem el COP:

$$COP = \frac{Qf}{Wc} = \frac{11kW}{9,088kW} = 1,21$$

Per últim si es vol saber la relació de compressió s'ha de dividir la pressió a la sortida del compressor per la pressió a l'entrada:

$$r_c = \frac{P_{compressor}}{P_{evaporador}} = \frac{9000kPa}{5087kPa} = 1,77$$

A la vista dels resultats observem que, per començar, s'està parlant de pressions de fins a 90 bars, cosa que complica el disseny d'un sistema amb aquest refrigerant ja que totes les peces hauran de resistir pressions força altes. Aquest compressors hauran de ser molt robustos i tindran una cilindrada menor degut a l'alta capacitat volumètrica del R744. A més degut a que la secció del tub de succió és proporcional a la capacitat volumètrica aquesta serà bastant menor.

En quant a consum energètic i COP trobem que no destaca per la seva eficiència i poc consum. No obstant, aconseguir els objectius climàtics es possible amb aquesta alternativa i la instal·lació es pot millorar ajustant el bescanviador i calculant quines condicions de treball són les idònies per aconseguir un millor COP.

Els compressors per a aquest refrigerant habituen a ser de grans dimensions ja mai no han tingut una gran importància en l'automoció, on les mides tenen molta importància, però si en grans instal·lacions fixes. El grup Daimler AG (Mercedes) és l'únic que aposta actualment per el CO<sub>2</sub> com a nou refrigerant per els seus vehicles però aquesta alternativa està actualment en desenvolupament. El principal proveïdor de compressors per a aquesta comesa és Sanden, un dels fabricants de compressors més important a nivell mundial i que també disposa de compressors per R1234yf. Aquest pacte entre el fabricant de compressors i un dels gegants del sector de l'automòbil és pot consultar a

Degut a que Sanden està desenvolupant aquests compressors per un fabricant en concret i encara no s'estan utilitzant en vehicles en circulació la informació sobre els compressors no és publica en cap web de recanvis i el propi fabricant no la comparteix degut a que explica que es tracta d'informació classificada.

Per tant comparar les dades obtingudes amb dades reals d'un catàleg és impossible i com a conseqüència ara per ara no es pot proposar un model concret com a millor alternativa per a aquest sistema.

Per altre banda com que les normatives explicades a l'apartat 5 ja són vigents és d'esperar que el desenvolupament d'aquest tipus de compressors creixi molt els pròxims anys i que aquestes informacions deixin de ser privades.

Pel que fa a la resta de components també hauran de ser específics per a aquest refrigerant ja que han de ser més robustos per aguantar les altes pressions. Això implica que l'espessor dels conductes haurà de ser major cosa que implica un augment de pes total.

Igual que passa amb els compressors, la resta de components requerits per un sistema amb R744 com a refrigerant existeixen però estan desenvolupats per a altres tipus d'instal·lacions més grans, no pas per encaixar en un vehicle. En conseqüència no és possible trobar entre els proveïdors habituals per a vehicles elements com evaporadors especials per a treballar a altes pressions.

La solució a aquesta falta d'informació sobre components específics per a CO<sub>2</sub> és suposar que els elements proposats a l'apartat 11.1. són prou resistents com per treballar a una pressió màxima 5,6 cops superior al cas d'estudi anterior. Per tant l'evaporador, compressor i vàlvula d'expansió són els mateixos, falta només trobar un bescanviador de calor adient.

El bescanviador necessari ha de suportar una pressió de 9 bars com a mínim i ha d'estar dissenyada per a circuits de refrigeració i calefacció. També és adient que el seu pes i la seva mida siguin ho més petit possible dintre de les possibilitats que ofereix el mercat.

S'escull la sèrie K del fabricant Kaori, aquesta sèrie és la gama més completa de mides i la més utilitzada del fabricant per aplicacions de calefacció i refrigeració.

Dins d'aquesta sèrie hi ha bescanviadors de níquel i de coure sol o coure reforçat.

Material de soldadura	Cobre	Cobre (Reforzado)	Níquel
	(A1,A2/B1,B2)		
Máx. presión de trabajo (bar)	30/30	45/30	10/10
Mín. presión de prueba (bar)	43/43	65/43	15/15
Máx. temperatura de trabajo (°C)	200°C		

[41] Taula 25. Condicions de treball del bescanviador

Entre les tres opcions és preferible el coure ja que la màxima pressió de treball en aquesta instal·lació de R744 és de 9 bar, però tot i que el níquel la podria suportar està massa a prop del màxim del bescanviador i qualsevol sobrepressió podria espatllar el component i perjudicar a tot el sistema.

## 11. PRESUPOST

Per elaborar un pressupost amb el que saber quin seria el cost aproximat de la realització d'un projecte com aquest per part d'un enginyer de projectes el primer que s'ha de saber és quin és el sou mitjà d'aquesta professió.

Segons el portal de treball **Indeed** [24] el salari mitjà per aquest professionals és de 24.000€ anuals. Per saber el sou per hora de treball caldria dividir aquest salari per les hores totals de treball anuals. Un any té 52 dissabtes i 52 diumenges, uns 16 dies festius entre festes locals, nacionals i el Nadal, uns 3 dies lliures de mitjana i uns 25 dies de vacances també com a mitjana. En total són 148 dies no laborables contra els 217 laborables. Si durant aquests 217 dies es realitza una jornada laboral habitual de 8h el resultat són 1736h. Per tant el salari per hora és de 13,82€/h aproximadament.

Si es considera que s'han dedicat al voltant d'unes 400h entre recerca d'informació, elaboració del treball i correcció d'aquest el cost resultant és de 5.528€.

Aquesta xifra és només orientativa ja que no és del tot real i depèn de multitud de factors. Per exemple cal indicar qui ha d'abonar aquest import, si es tracta de la mateixa empresa en la que treballa l'enginyer al import calculat cal afegir els impostos vinculats a aquest sou. Per exemple un 0,6% per formació, un 5,5% per l'atur, un 1,35% per AT i EP i un 23,6% de contingències comuns. Per tant caldria incrementar sobre un 31% el cost de les hores de treball de l'enginyer. Com a conseqüència si el cost de la realització del projecte es vol saber des del punt de vista de l'empresa costaria al voltant dels 7250€.

Per altre banda, si aquest projecte es vol encarregar a una altre empresa que ofereix aquest servei a part dels impostos que s'hagin d'afegir per la venda d'aquest treball cal sumar un benefici per l'empresa a la qual treballa l'enginyer, en cas de que no sigui autònom. Per tant probablement el cost d'aquest projecte no seria menor als 10.000€.

Per últim, si l'enginyer fos un projectista autònom també caldria incrementar alguns impostos als 5.528€, per exemple l'IVA que hauria d'aplicar per la venda de la seva feina.

## 12. CONCLUSIONS

Partint de l'objectiu inicial de trobar refrigerants alternatius al R134a per a vehicles elèctrics, tenint en compte que no afectin excessivament en l'autonomia del vehicle, que tinguin un mínim impacte ambiental i al mateix temps que compleixi les normatives europees vigents i sigui segur per als passatgers entre altres aspectes importants descrits al treball, s'arriba a una sèrie de conclusions exposades a continuació.

Degut a que l'autonomia d'un vehicle elèctric és un dels aspectes més importants a tenir en compte alhora del disseny, i que per motius de seguretat, la reducció de pes a partir de la utilització de materials més lleugers no és recomanable, gairebé tota la responsabilitat d'estalvi energètic recau en la climatització del vehicle i és per això que el consum energètic de cadascuna de les alternatives, és determinant. Sigui quin sigui el refrigerant utilitzat, és bona idea utilitzar l'opció de recirculació d'aire al iniciar la climatització de la cabina, ja que representa un estalvi energètic notable.

Existeixen dues alternatives viables que compleixen les condicions establertes; el R1234yf i el R744.

Primerament, respecte al R744 queda clar, que compleix la Directiva Europea 2006/40/CE vigent a partir de la fase 3 d'aquesta, ja que té un molt baix impacte mediambiental, per tant pot ser utilitzat pels fabricants si aquests volen.

En el que a seguretat respecta, si bé és cert que el CO<sub>2</sub> és un gas no inflamable, si que és tòxic i pot arribar a ser mortal a més de que és difícil de detectar, tant per sensors i persones. Per tant, en cas de fuga a la cabina podria perjudicar greument als passatgers.

Degut a que les pressions de treball del R744 són molt més altes que amb els antics refrigerants utilitzats, cal redissenyar tot l'equip de climatització, ja que la majoria d'elements emprats amb els antics gasos no poden seguir sent utilitzats i per exemple no du condensador sinó refredador. Per altre banda, aquesta alta pressió assegura que no hi hagi infiltracions d'aire exterior dins del circuit.

També s'ha observat en els estudis mostrats, que el rendiment d'un equip que utilitzi R744 dependrà molt de les condicions climàtiques exteriors, sent més eficient amb temperatures baixes o temperades i menys amb temperatures altes, quan més sol utilitzar-se l'aire condicionat. A més, si el vehicle es troba parat al no haver-hi massa circulació d'aire pel refredador aquest no redueix el suficient la temperatura i per tant, l'eficiència es veu afectada negativament.

Per últim, respecte al CO<sub>2</sub> degut a que és un gas amb propietats termofísiques tan diferents als refrigerants, que fins ara han estat més utilitzats, per això els elements requerits en el redisseny de l'equip climatitzador, no són oferts per cap fabricant. Per tant cal contactar-hi per aconseguir peces amb les característiques necessàries, cosa que encareix el cost del vehicle. Això ha provocat que en aquest estudi, no es puguin proposar elements que compleixin les característiques necessàries. Per exemple, com s'ha explicat al projecte, el grup Daimler aposta per aquest refrigerant i ja està

començant a desenvolupar compressors per als seus vehicles però aquesta informació és confidencial.

En relació al R1234yf també compleix la Directiva Europea 2006/40/CE vigent i per tant pot ser utilitzat.

En quant a seguretat, tot i que s'ha demostrat que pot iniciar un foc, la probabilitat de que això passi en l'entorn d'un vehicle és gairebé 0, a més de que en aquest cas d'estudi s'ha de contemplar que un vehicle elèctric no té dipòsit de benzina per tant la perillositat d'una hipotètica flama es redueix. Per tant, no és un dels aspectes que més preocupació pot generar alhora d'escollir entre aquest i un altre refrigerant.

Degut a que les propietats termofísiques del R1234yf són molt similars a les del R134a, que era el refrigerant per excel·lència en els vehicles, la major part de les peces que componen el climatitzador d'un vehicle poden seguir sent utilitzades tot i implantar aquest nou refrigerant. Això facilita als fabricants complir la Directiva Europea, canviant només el refrigerant sense haver d'invertir massa en I+D.

Si es compara entre els dos refrigerants alternatius que compleixen els requisits es pot concloure, que en aquest precís moment, el R1234yf és la millor alternativa. En els càlculs realitzats s'ha obtingut que el consum energètic per a aquest refrigerant és de  $3,388kW$  envers dels  $9,088kW$  necessaris pel  $CO_2$  treballant en les mateixes condicions. Aquesta diferència de consum energètic pot ser determinant en un cotxe elèctric.

En quant a seguretat pot ser més perillós i probable, encara que les possibilitats siguin mínimes, una intoxicació difícilment perceptible degut al refrigerant i que podria estar causada per una fuga, deguda a l'alta pressió a la qual treballa el circuit. També cal que tot el circuit del refrigerant estigui aïllat el màxim possible dels elements corrosius.

En quant al cost de l'equip climatitzador, ja que els elements per R1234yf poden ser els mateixos que s'utilitzaven anteriorment i per R744 cal dissenyar o utilitzar de nous, econòmicament parlant la millor opció per implantar és el R1234yf.

Per finalitzar, degut a que la Directiva Europea és molt recent, els fabricants no han tingut encara massa temps per investigar noves instal·lacions, que puguin ser més eficients amb R744. La millor solució, per adaptar-se a la nova directiva, és substituir el R134a habitual per R1234yf. Mentre que per una altra banda, caldria començar futures investigacions sobre la fabricació dels elements que composarien un sistema amb R744 i les condicions de treball d'aquest, per tal de reduir el consum energètic i l'impacte mediambiental notablement respecte l'actualitat.

## ANNEXOS

### Abreviatures i símbols

GM – General Motors

J – Joule

Pa – Pascal

L – litres

s – segons

m – metres

K – kelvin

Kg- quilogram

Km – kilòmetre

V – volt

A – Amper

W – Watt

UNEP – Programa de les Nacions Unides per l’Ambient

ODP – Potencial d’esgotament d’ozó

GWP – Potencial d’escalfament global

h – entalpia

CFC – Clorofluorcarboni

h<sub>fg</sub> – entalpia de vaporització

h<sub>f</sub> – entalpia de líquid saturat

h<sub>g</sub> – entalpia de vapor saturat

HFO – Hidrofluorefina

HCFC – Hidroclorofluorocarboni

HFC – Fluorocarboni hidrogenat

C – carboni





H – hidrogen

F – flour

A/C – Aire condicionat

rpm – revolucions per minut

$\omega$  - volicitat angular

$\eta$  - rendiment

$\eta_v$  – rendiment volumètric

PTC – Coeficient de temperatura positiu

HVAC – Ventilació, escalfament i aire condicionat

CE – Comissió Europea

UE – Unió Europea

MAC – Aire condicionat mòbil

PAG – Polialquilenglicol

COP – Coeficient operacional

ISO – Organització Internacional d'Estandardització

I+D – investigació i desenvolupament

ASHRAE – Societat Americana d'Enginyers de Calefacció, Refrigeració i Aire Condicionat

HBM – Mètode de balanç de calor

WFM – mètode de factor de ponderació

CLTD – mètode de càlcul de la variació de la temperatura de càrrega de refrigeració

DTM – Suma inèrcies tèrmiques

m - massa

$c_x$  – calor específic

M – calor metabòlica

$A_{Du}$  – àrea DuBois

U – coeficient de transferència de calor

LM – factor de latitud



$I$  – radiació

$S$  – àrea superficial

$\tau$  – transmissivitat

$\rho_g$  – coeficient de reflectivitat del terra

$\alpha$  – absortivitat

$R$  – resistència

$K$  – conductivitat tèrmica

$v$  – velocitat

$v_{esp}$  – volum específic

$q_s$  – càrrega sensible

$q_l$  – càrrega latent

$Q$  – Cabal

$r_c$  – relació de compressió

$W_c$  – potència requerida

$Q_f$  – potència frigorífica

## Normativa

### Normativa sobre l'esgotament de la capa d'ozó causat pels refrigerants

#### Reglament (CE) N°2037/2000 del Parlament Europeu i del Consell sobre les substàncies que esgoten la capa d'ozó

S'ha comprovat que les emissions continuades als nivells del moment de substàncies que esgoten la capa d'ozó està deteriorant considerablement a aquesta. S'han produït destruccions sense precedents a la zona àrtica i un esgotament greu a la zona africana. Degut a que aquest esgotament augmenta les radiacions de rajos ultraviolats i constitueix una amenaça per a la salut i el medi ambient es considera necessari adoptar mesures per garantir una protecció suficient per a la salut humana i del medi ambient dels resultats nocius de les emissions.

A partir de la VII Conferència de les parts participants en el Protocol de Montreal celebrada el 1995 a Viena es considera que s'han de complir els compromisos assumits per tota la Comunitat reunida al Conveni de Viena i a les últimes adaptacions i esmenes del Protocol de Montreal.

Degut a la disponibilitat de tecnologies de substitució per a les substàncies que esgoten la capa de ozó es procedeix a establir mesures de control molt més estrictes que les establertes al reglament anterior vinculat amb el Protocol de Montreal (CE) n° 3093/94.

Com a conseqüència d'això el reglament citat ha de ser modificat i eliminar la producció dels clorofluorocarburs, els clorofluorocarburs totalment halogenats, els halons, el tetraclorur de carboni, el 1,1,1-tricloroetà i els hidrobromofluorocarburs.

Per tant queda prohibida la producció d'aquestes substàncies a excepció de casos excepcionals que ja estan inclosos al Protocol de Montreal.

Tot i la prohibició completa d'aquestes substàncies el reglament n°3093/94 també preveu el control de la producció de qualsevol altre substància que esgoti la capa d'ozó però no estableix cap control sobre la producció de hidroclorofluorocarburs. No obstant s'indica que és poden crear controls pactats pels participants del protocol de Montreal un cop la tecnologia creï alternatives a aquesta substància que no afectin a l'esgotament de la capa d'ozó. També s'indica que es prohibeix l'ús dels hidroclorofluorocarburs en aerosols, com a dissolvents, per a la producció d'espumes, com a gas portador de productes fertilitzants i com a refrigerant. Aquesta última aplicació es prohibeix gradualment segons els diferents aparells, potències i sectors.

A més s'estableix que la utilització d'aquesta substància ha de ser controlada per cada país i tractar de limitar el seu a aplicacions on no es puguin utilitzar altres substàncies.

També s'explica que és necessari recuperar les substàncies regulades i evitar les fuites d'aquestes.

S'exigeix la presentació d'informes sobre el comerç de substàncies que esgotin la capa d'ozó, per tant els productors, importadors i exportadors han de presentar un informe anual sobre les seves activitats relacionades.

Per últim es demana a les Parts que formen part del Protocol de Montreal que prengui mesures per tal d'evitar la producció i la distribució de noves substàncies perjudicials per a l'ozó.

Aquest reglament va entrar en vigor a partir del dia 1 d'octubre de l'any 2000.

## **Normativa sobre l'efecte hivernacle causat pels refrigerants**

### Directiva europea 2006/40/CE sobre els refrigerants utilitzats en sistemes de aires condicionats mòbils

En base a les diferents reunions, estudis i acords sorgits a partir del Protocol de Kyoto respecte a la reducció d'emissions i utilització de gasos d'efecte hivernacle la Comissió Europea va establir la Directiva Europea 2006/40/CE la qual es compon de 3 fases.

#### **Fase 1**

S'estableix que des del 21 de juny de 2008 els fabricants d'automòbils no poden obtenir la homologació per els seus nous vehicles que estiguin equipats amb un MAC que utilitzi un gas amb un potencial d'escalfament atmosfèric superior a 150, que tingui fuites de més de 40 grams de refrigerant per any en els casos d'un sistema d'evaporador o fuites de 60 grams de refrigerant per any en els casos de doble evaporador.

Aquesta fase s'ha aplicat a tots els vehicles nous al mercat de la UE fins al 21 de juny de 2009.

#### **Fase 2**

Aquesta fase estableix que a partir del 1 de gener de 2011 els sistemes d'aire condicionat dels nous vehicles han de utilitzar refrigerants amb un baix impacte sobre el clima (en línia amb la directiva de la UE "MAC" 2006/40/CE de l'aire condicionat mòbil). Els gasos fluorats d'efecte hivernacle amb un potencial de escalfament global (PWG) superior a 150 GWP prenent com a referència el CO<sub>2</sub> com a 1 GWP ja no estan autoritzats a ser utilitzats en sistemes de climatització d'aire mòbil i per tant l'implantació de refrigerants que no compleixin la normativa en vehicles nous per part dels fabricants estarà castigada per la Comissió. Els fabricants d'automòbils són lliures d'elegir un refrigerant o sistema sempre que compleixi amb la obligació de la directiva.

Al 2011 la Comissió Europea va ser informada d'un gran problema de subministrament del refrigerant R1234yf, el qual era la principal alternativa als refrigerants utilitzats fins aleshores i un dels més escollits per la indústria de l'automòbil. Degut a aquestes circumstàncies excepcionals en relació al problema per part de la indústria d'aconseguir un subministrament adequat d'aquest refrigerant i amb relació exclusiva a aquest succés

la Comissió Europea es va abstenir d'iniciar els procediments de infracció als fabricants que seguien utilitzant el gas habitual (R134a) en la producció dels vehicles fins al 31 de desembre de 2012.

A partir del 1 de gener de 2013 la Directiva de MAC es plenament aplicable i pot multar als fabricants que no la compleixin. Això significa que els vehicles de motor registrats i comercialitzats a la Unió Europea han d'estar adaptats a aquesta legislació conforme a la decisió estipulada. Tot i així fabricants alemanys no van complir aquesta normativa i varen provocar un contacte entre les autoritats alemanyes i la Comissió Europea per tal de resoldre aquest problema. També es va informar a la Comissió Europea de la practica d'aplicacions d'homologacions anteriors a la fase 2 per part d'altres fabricants.

Així ho expressa el Memoràndum publicat per la Comissió Europea el 23 de gener de 2014 a Brussel·les.

### **Fase 3**

Des de l'1 de gener de 2017 està totalment prohibit l'ús de gasos fluorats d'efecte hivernacle amb un potencial d'escalfament atmosfèric superior a 150 en tots els vehicles nous a la UE. Els vehicles nous que utilitzin aquests gasos no seran registrats i no podran entrar en servei a la Unió Europea.

## Refrigerants

### Propietats termodinàmiques dels refrigerants

#### Temperatura:

Hi ha tres temperatures importants per a un refrigerant i que s'han de considerar a l'hora d'escollir un. Aquestes temperatures són la d'ebullició, la crítica i la de congelació.

Generalment aquestes temperatures s'indiquen a pressió atmosfèrica. El punt d'ebullició d'un refrigerant ha de ser baix per tal de tenir una temperatura baixa a l'evaporador. Aquest punt és dependent de la pressió, així que si podem controlar la pressió es pot modificar el punt d'ebullició per tal d'aconseguir el desitjat.

Una altra temperatura a considerar a l'escollir un refrigerant és la temperatura crítica, ja que cap refrigerant es condensarà a una temperatura major que la crítica. Per tant aquesta temperatura ha de ser superior a una possible temperatura ambient.

Per últim la temperatura de congelació del refrigerant ha de ser més baixa que la temperatura de treball a l'evaporador per evitar danys al circuit.

#### Pressió:

La pressió a la qual treballa un sistema de refrigeració és una propietat molt important. Primer és necessari que treballi a una pressió superior a l'atmosfèrica tant a l'evaporador com al condensador per tal d'evitar infiltracions d'aire. És convenient treballar amb una pressió d'evaporació el més baixa possible però superior a l'atmosfèrica.

Per un altra banda la pressió de condensació determinarà la mida del compressor i del condensador, per tant també s'ha de considerar i s'ha de procurar que sigui suficientment baixa.

Refrigerant	Evaporador a -15°C	Condensador a 30°C
	kPa	kPa
R12	183	754
R22	296	1192
R134a	164	767
R170	1627	4660
R500	214	880
R502	348	1319
R717	236	1167

[Elaboració pròpia] Taula 26. Pressions d'evaporació i condensació de diferents refrigerants



Entre els refrigerants que es poden veure a la taula anterior (1.) el millor és el R134a ja que treballa a pressions pròximes a l'ideal ja que la seva pressió d'evaporació és molt baixa i la seva pressió de condensació no és massa alta per tant el compressor requereix no serà molt gran.

### **Volum específic:**

Al variar la temperatura del refrigerant també ho fa el seu volum específic, augmentant en el cas d'augmentar la seva temperatura i disminuint en cas de disminuir la seva temperatura.

El volum específic és una dada molt important quan el refrigerant es troba en la fase de vapor. S'ha de procurar que aquest valor sigui el més petit possible, ja que d'aquest valor dependrà el desplaçament volumètric del compressor.

### **Entalpia de vaporització (hfg):**

Aquest valor és la quantitat d'energia necessària per a què un quilogram del refrigerant utilitzat passi completament de estat líquid a estat gasós. També és conegut com a calor latent de vaporització. En els sistemes de refrigeració aquest canvi es produeix a l'evaporador.

En els refrigerants interessa que aquest valor sigui alt per a què la quantitat de calor transferida sigui la més alta possible.

### **Entalpia de líquid saturat (hf):**

Es tracta de la quantitat de energia que conté un quilogram del refrigerant en estat líquid saturat, es a dir, a la seva temperatura de saturació.

### **Entalpia de vapor saturat (hg):**

Es tracta de l'energia total que conté el refrigerant a temperatura de vapor saturat. Està composta per la entalpia de líquid saturat més la entalpia de vaporització.

$$hg = hfg + hf$$

### **Densitat:**

La densitat es defineix com el pes per unitat de volum ( $\text{kg/m}^3$ ). La majoria dels refrigerants en estat líquid tenen una densitat més alta que la de l'aigua. Aquesta densitat varia depenent de la temperatura a la que es troba el fluid, a temperatures més altes el fluid s'expandeix i per tant la seva densitat és més alta també. Per altre banda a baixes temperatures la seva densitat disminueix. Aquesta dada pot ser útil per multitud de càlculs.

## Classificació dels refrigerants

Hi ha una gran quantitat de formes de classificar els refrigerants. Totes elles serveixen per a facilitar l'elecció d'un fluid refrigerant un cop es coneixen les característiques del sistema on es vol utilitzar, la normativa i les temperatures i pressions de treball desitjades.

Una de les classificacions és per pressions de treball, existeixen 4 grups diferents:

- Baixa pressió. La seva temperatura d'ebullició és superior als 20°C.
- Mitja pressió. La temperatura d'ebullició està entre els 20°C i els -30°C.
- Alta pressió. La temperatura d'ebullició és baixa, entre -30°C i -80°C.
- Molt alta pressió. La temperatura d'ebullició és molt baixa, inferior a -80°C.

Una altre classificació existent depèn de normatives de seguretat:

- Grup primer: No és ni tòxic ni combustible. (R12, R22, R134a, R404a).
- Grup segon: És tòxic o corrosiu. Combustible o explosiu en una concentració superior o igual a 3,5% en volum. (R717).
- Grup tercer: Combustible o explosiu a una concentració inferior a 3,5%. (butà).

Un altre forma de classificar-los seria per la seva composició química (fig. 2.) :

- CFC's: Es caracteritzen per tenir dos àtoms de clor. Són molt estables a l'atmosfera ja que poden durar més de 100 anys. Contribueixen a la destrucció de la capa d'ozó. Alguns d'aquests refrigerants són per exemple R11, R12, R113, R114.

- HCFC's: A diferència dels primers només contenen un àtom de clor. La seva vida és d'entre 2 i 28 anys i afecten a la capa d'ozó aproximadament entre un 90 i un 98% menys que els CFC's. No obstant influeixen molt més en l'efecte hivernacle que els CFC's. Alguns exemples són el R22, R123 i R124.

- HFC's. Es componen per hidrogen fluor i carboni. No tenen efecte en la capa d'ozó però sí en l'efecte hivernacle. Alguns exemples són el R152a, R32, R143a i R134a.

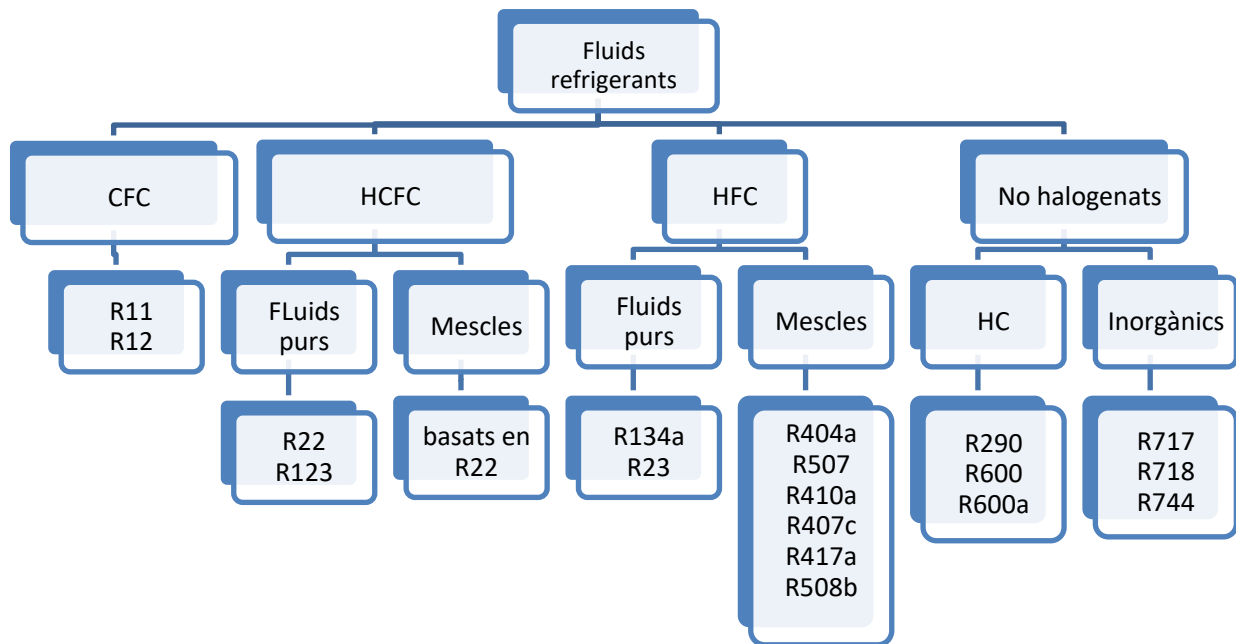
Per últim també podem classificar alguns refrigerants com fluids de treball naturals. Aquests són:

Amoniac (R717): Molt bones propietats refrigerants però altament tòxic i combustible.

Hidrocarburs: El propà i el butà podrien ser utilitzats com a refrigerants però són altament inflamables.

Aigua (R718): Per a molt altes temperatures pot ser un fluid de treball, però no s'utilitza.

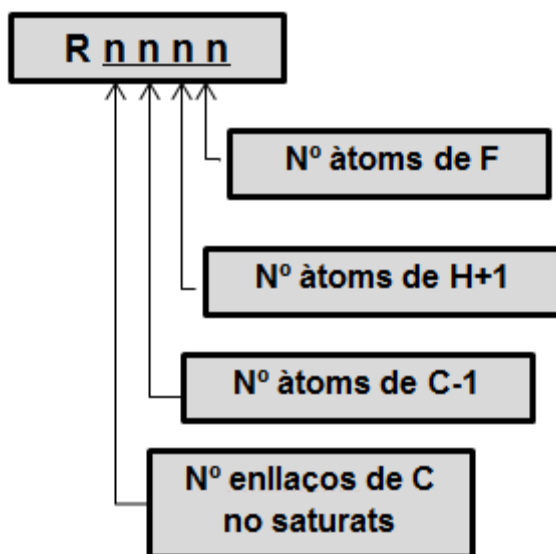
CO<sub>2</sub> (R744): Té bones característiques com a refrigerant però requereix pressions de treball força més altes que la resta de refrigerants.



[Elaboració pròpia] Fig 40. Classificació segons composició química

### Nomenclatura

El nom que té un refrigerant ve definit per la seva fórmula química. S'inicia amb una R i prossegueix tal com indica l'expressió de la figura 41.



[Elaboració pròpia] Fig. 41. Estructura de la nomenclatura

En cas de que la molècula tingui àtoms de brom s'afegeix una B a la dreta seguida del nombre d'àtoms d'aquest element.

Si es tracta d'un derivat cíclic es posa una C a continuació de la R inicial.

En el cas de les isomeries una molècula de més de C pot tenir diversos tipus d'associació isomèrica  $NC \geq 2$ .

Si  $NC=2$  s'escriu una lletra minúscula al final de la designació. La millor configuració segons el pes atòmic vinculats a cada carboni no porta cap lletra, la segona millor porta una "a" al final, la tercera millor una "b" i així successivament.

Si  $NC=3$  la primera lletra que l'acompanyarà designa els àtoms de l'enllaç entremig i la segona designa la simetria segons el pes atòmic i seguirà el mateix procediment que en  $NC=2$ , es a dir, la més idònia no tindrà lletra, la segona millor serà la "a" i així successivament.

En el cas de que el refrigerant sigui una mescla de dos o mes refrigerants diferents s'afegirà una lletra majúscula en cas de que estiguin formats per els mateixos components però amb diferents proporcions.

Per exemple:

R407A (R23/R125/R134a) (20/40/40%)

R407B (R23/R125/R134a) (10/70/20%)

R407C (R23/R125/R134a) (23/35/53%)

Si es tracta de fluids refrigerants inorgànics la seva nomenclatura es definirà pel seu pes molecular. El fluid s'anomenarà segons la següent expressió: R700 + pes molecular. Per exemple en el cas del  $\text{CO}_2$  el seu pes molecular és  $12+2 \times 16=44$  per tant R744.

## R134a

El R134a es tracta d'un refrigerant haloalcà també conegut com a 1,1,1,2-tetrafluoroetà degut a la seva fórmula química  $\text{CH}_2\text{F}-\text{CF}_3$ . Des de els anys 90 fins a l'actualitat ha sigut un dels gasos refrigerants més utilitzats a la indústria de l'automòbil degut a que era un bon substitut del refrigerant R-12, ja que té un potencial d'esgotament de l'ozó molt més baix. A més és un gas no inflamable el qual li serveix per complir moltes normatives de seguretat. No obstant el seu GWP és força alt, exactament de 1320, i és per això i per les noves normatives de la Comissió Europea que el seu us s'ha anat veient reduït fins a l'inici de l'any 2017, on finalment ha estat prohibida la seva utilització als vehicles nous.

Propietats termodinàmiques	R134a
Massa molar (kg/kmol)	102.03
Punt ebullició a 1 atm (K)	247.08
Punt congelació (K)	169.85
Temperatura crítica (K)	374.21
Pressió crítica (Mpa)	4.06
Densitat crítica (kg/m <sup>3</sup> )	511.9
Densitat del líquid a 25°C (kg/m <sup>3</sup> )	1206
Calor de vaporització al punt d'ebullició (Kj/Kg)	217.2

[16] Taula 27. Propietats R134a

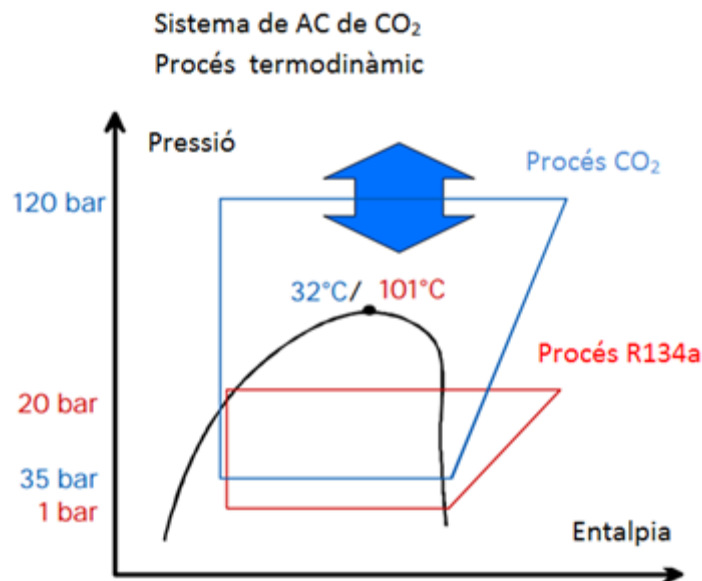
## CO<sub>2</sub>

A partir de la dècada del 1890 es va començar a utilitzar en sistemes de refrigeració marítimes, en concret en la congelació i transport de productes alimentaris provinents d'Argentina, Austràlia i Nova Zelanda els quals eren transportats en vaixells refrigerats cap a Europa.

Degut a aquests inicis cada cop va tenir més rellevància en aplicacions marines, des de refrigeradors i congeladors per mantenir les provisions de la tripulació fins a congeladors industrials per a grans vaixells pesquers o de transport. Aquest tipus de congeladors industrials van ser cada cop més populars fins consolidar-se com a la forma més eficient per a la importació i exportació de productes alimentaris.

Al aparèixer els primers refrigerants sintètics la popularitat del CO<sub>2</sub> va caure i a la dècada dels 50-60 els CFC ja dominaven tots els sistemes de refrigeració per transport d'aliments i també els sistemes de refrigeració terrestre.

Un dels principals inconvenients d'aquest gas és que la seva pressió de treball és molt més alta que la dels seus principals competidors. Per exemple a la figura 40 podem veure la comparativa del CO<sub>2</sub> respecte del R134a.



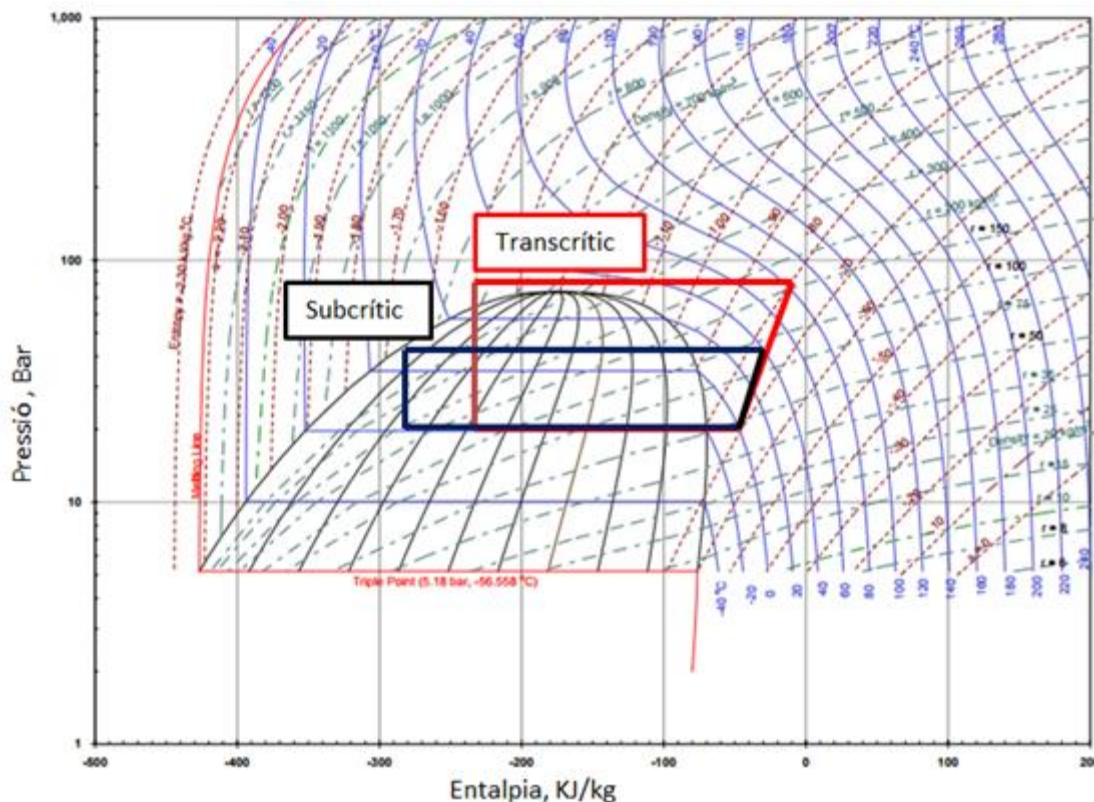
[16] Figura 42. Comparació cicle CO<sub>2</sub> amb R134a

Això implica que les marques que vulguin substituir el refrigerant R134a utilitzat actualment pel CO<sub>2</sub> han de tornar a dissenyar tot el sistema de climatització ja que les peces i tubs necessaris canvien molt. Cal dir que els principals fabricant que opten per utilitzar aquest refrigerant son els fabricants Alemanys i entre aquestes marques els models elèctrics no són gens habituals de moment.

Propietats termodinàmiques	R134a	R1234yf	CO <sub>2</sub>
Massa molar (kg/kmol)	102.03	114.04	44.01
Punt ebullició a 1 atm (K)	247.08	243.70	216.00
Punt congelació (K)	169.85	desconeguda	194.70
Temperatura crítica (K)	374.21	367.85	301.00
Pressió crítica (MPa)	4.06	3.38	7.39
Densitat crítica (kg/m <sup>3</sup> )	511.9	478.01	468.00

[16] Taula 28. Propietats termodinàmiques R134a, R1234yf i CO<sub>2</sub>

Com podem observar a la taula anterior la pressió crítica del CO<sub>2</sub> es de 7.39MPa i la seva temperatura crítica d'aproximadament 31°C. Els sistemes de CO<sub>2</sub> operen diferent depenent si treballen per sobre o per sota del punt crític. En un sistema subcrític la temperatura del CO<sub>2</sub> a la etapa isotèrmica després de la compressió del fluid esta per sota de la temperatura crítica mentre que en un sistema transcritic la temperatura del CO<sub>2</sub> a la sortida del refredador del gas està per sobre dels 31°C i la temperatura d'evaporació és més baixa.



[1] Figura 42. Comparació cicle transcric i subcrític

En el cas dels sistemes subcrítics el més habitual és que el  $\text{CO}_2$  sigui utilitzat com a refrigerant a l'etapa de baixa temperatura d'una instal·lació en cascada. El calor resultant de la condensació del  $\text{CO}_2$  és absorbida per el refrigerant a la fase de temperatura mitjana. Aquest segon refrigerant normalment és el R134a i aquestes instal·lacions són més grans i ocupen més espai que les habituals als vehicles, per tant la seva instal·lació és poc viable per temes d'espai. Tenint en compte això i que aquest projecte intenta presentar alternatives a l'actual R134a, utilitzat en aquest tipus d'instal·lacions, no s'estudiarà aquesta alternativa.

En els sistemes transcrítics el compressor eleva la pressió del gas per sobre de la pressió crítica i el calor s'allibera a l'atmosfera refredant el gas de la descàrrega sense arribar a condensar-lo. Per tant aquest sistema destaca per la no utilització de condensador sinó un refredador de gas.

Quan el gas refredat passa a través de la vàlvula d'expansió aquest es converteix en una mescla de líquid i gas. Si es supera la pressió de descàrrega del compressor la quantitat de calor que absorbeix el refrigerant es veu afectada, per tant hi ha un punt òptim de funcionament que equilibra l'energia addicional requerida per arribar a la pressió de descàrrega més elevada i el refredament aconseguit mitjançant la cessió de calor. Quan més baixa sigui la temperatura a la sortida del refredador del gas més eficient serà el sistema.



## Materials a la cabina del vehicle i les seves propietats tèrmiques

Els materials han evolucionat molt amb el pas dels anys fent-se cada cop més sofisticats, millor dissenyats i més segurs. Aquests han anat canviant segons evolucionava la indústria de l'automòbil i les seves necessitats així com els avenços en les indústries pròpies de cadascun dels materials.

La major part del pes d'un vehicle ve per la utilització de l'acer. Principalment aquest material es utilitza per crear el xassís, tant els baixos del vehicle com la gàbia que protegeixen als passatgers en cas d'impacte gràcies a la seva capacitat d'absorció d'energia degut a la deformació. Les portes, el sostre i alguns panells del cos del vehicle estan creats també a partir d'acer. També s'usa per acomodar el motor i moltes altres parts.

Gràcies a l'evolució de la indústria els fabricants poden oferir al món de l'automòbil varietat d'acers que poden ser usats en diferents parts del vehicle. Existeixen acers convencionals, acers d'alta resistència, acers de molt alta resistència i acers de màxima resistència.

L'acer convencional és un acer dolç sense aliatge, laminat en fred i amb poc contingut en carboni. Aquesta poca proporció de carboni provoca que el seu límit elàstic sigui massa baix per tant s'utilitza en peces de baixa responsabilitat estructural ja que no suporta esforços massa alts. Es pot trobar a aletes, portes i porta del maleter principalment.

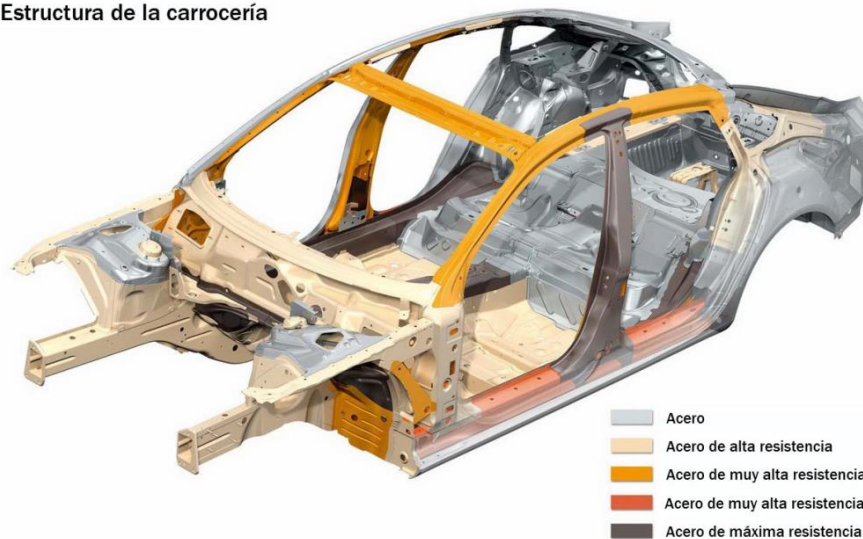
L'acer d'alta resistència han estat tractats per aconseguir un augment del seu límit elàstic. Per aconseguir-ho s'apliquen diferents mètodes com el Bake Hardening que consisteix en una cocció a baixa temperatura. També s'inclouen a aquest grup els acers amb aliatge al fòsfor. Són acers amb una matriu ferrítica que contenen fòsfor fins al 0.12% i es caracteritzen per la seva alta resistència. Aquests materials s'utilitzen principalment en portes, capós, sostre, aletes davanteres, etc.

Els acers de molt alta resistència es caracteritzen per tenir molt bones aptituds per a la distribució de les deformacions, un bon comportament a la fatiga i una alta resistència mecànica el que provoca una bona capacitat d'absorció d'energia. Degut a aquestes característiques s'utilitzen com a peces d'estructura i reforç.

Per últim els acers de màxima resistència es caracteritzen per una alta rigidesa, la seva capacitat de no deformar-se i també la seva capacitat d'absorbir grans energies. Solen ser acers martensítics o acers al bor i s'utilitzen per a protegir la cabina i evitar que penetrin objectes cap a l'interior així com a la zona del motor i del maleter.

**Audi A5 Sportback**

Estructura de la carroceria



[40] Figura 43. Materials que componen un vehicle

Degut a la constant necessitat de reduir els consums de combustible dels vehicles i de les directives mediambientals hi ha un extrem control en el pes dels vehicles. Per a reduir el pes s'analitza en detall quin tipus d'acer es requereix a cada part del vehicle per tal d'aconseguir les propietats idònies amb el mínim pes i també l'espessor de cadascun d'aquests elements, intentant aconseguir que sigui el mínim possible. Aquests acers poden ser més rígids en algunes zones o es poden doblegar per absorbir els impactes. Per suposat aquesta diferència del material provoca canvis també en les seves propietats de transmissió de calor.

Els cotxes d'avui en dia es componen cada cop més de una gran varietat de polímers els quals ajuden i molt en la reducció de pes abans mencionada. Actualment segons indica el American Chemistry Council dels Estats Units els plàstics componen el 50% de la construcció dels nous vehicles. Això es deu sobretot al seu baix cost, la seva durabilitat, la seva facilitat d'adaptar-se a qualsevol forma i el seu baix pes.

Un altre material utilitzat actualment és l'alumini, aquest va ser començat a utilitzar recentment degut al seu baix pes i a la seva resistència, al 2009 conformava un 9% del pes del vehicle. Cada cop més s'utilitza per a crear panells de la carrosseria sobretot en vehicles esportius.

La goma és un dels materials presents als vehicles, pren especial importància en els tancaments de les portes i les finestres actuant com a un bon aïllant.

El vidre està present als parabrises i finestres del vehicle així com als miralls i retrovisors. És un dels materials que més superfície de la cabina ocupa i a través del qual s'hi produeix una gran transferència de calor. A les finestres es tracta de vidre temperat el qual té major resistència ja que està endurit. El parabrises sol ser de vidre laminat el qual està compost per dues làmines de vidre entre les quals hi ha una làmina plàstica

de polivinilbutiral (PVB). En cas de trencament del parabrises els fragments de vidre queden units a la làmina de plàstic oferint una major resistència a la introducció d'objectes a l'interior del vehicle per motius de seguretat.

També existeix el vidre tintat el qual absorbeix una part de la energia solar reduint els efectes d'aquesta sobre el vehicle. Permet un elevat nivell de transmissió lluminosa tot i reduir el calor transferit cap a l'interior.

Degut a l'intent de reducció de costos i de massa final del vehicle l'aïllament rarament s'afegeix per reduir la càrrega tèrmica. Habitualment s'instal·la aïllament acústic i aquest ja es considera adequat com a aïllant tèrmic. Alguns vehicles nous aïllen els conductes del seu sistema HVAC per tal de reduir els guanys de calor durant el refredament i evitar pèrdues de calor durant l'escalfament.

Les resistències tèrmiques dels materials més habituals als vehicles són les següents:

Material	Conductivitat tèrmica (W/(m·K))
acer	47-58
Alumini	209-232
Fibra de vidre	0,035
Vidre temperat	1,00
Vidre laminat	1,05

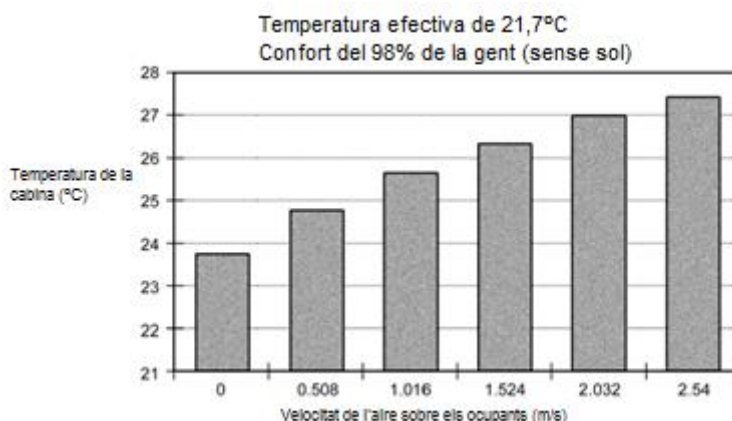
[4] Taula 29. Comparació entre estudi numèric i experimental amb R744

## Factors a considerar en una nova instal·lació

Les consideracions principals de l'ASHRAE a tenir en compte que per al disseny de la climatització d'un automòbil inclouen la qualitat de l'aire de la cabina i el confort tèrmic a aquesta, la temperatura i la humitat ambient, l'entorn operatiu de tots els components que hi formen part, els contaminants que pugui tenir l'aire, les fuites en forma de calor del vehicle en general (escapament de gasos i altres components) i del motor en concret en cas d'haver-hi, alguns paràmetres físics, la durabilitat prevista del sistema, el consum d'energia elèctrica resultant, la capacitat de refrigeració de l'equip, els ocupants del vehicle, les infiltracions pels tancaments, l'aïllament tèrmic, l'efecte de la radiació solar, alguns factors de seguretat al vehicle relacionats amb el confort tèrmic i visibilitat i per últim el soroll i la vibració del sistema.

### Qualitat de l'aire i confort tèrmic

Segons els estudis realitzats per l'ASHRAE recopilats a l'*ASHRAE Handbook Applications* per aconseguir un confort adequat pels passatgers d'un cotxe cal que el sistema de climatització generi un flux d'aire al vehicle per tal d'arrancar el calor despresat pel cos dels ocupants i controlar l'acumulació d'humitat. Segons els resultats d'aquest estudi en condicions de temperatura de 22°C sense incidència de carrega solar per radiació el 98% de les persones estan còmodes sense cap flux d'aire sobre el seu cos. Si aquesta temperatura augmenta a 27°C el 98% de persones es sent còmode si la velocitat de l'aire és de 2,5m/s. Per tant si les sortides de ventilació del vehicle cap als ocupants poden oferir suficient flux d'aire el confort d'aquests s'aconseguirà més ràpid que no pas un vehicle amb un flux d'aire baix. Aquesta relació entre temperatura i velocitat d'aire necessària per aconseguir el confort dels ocupants es mostra a la figura 44.



[1] Figura 44. Relació velocitat d'aire requerida a 21,7°C respecte la temperatura de la cabina per arribar al 98% de confort

Tot i que aquest treball es fonamenta en els vehicles elèctrics és necessari considerar que la majoria de vehicles en circulació no ho són. Degut a aquesta majoria de vehicles amb combustibles fòssils les emissions dels seus tubs d'escapament poden provocar

que l'aire exterior estigui molt contaminat, especialment en zones d'alta concentració de tràfic. Els motors dièsel són els principals productors d'òxids de nitrogen com poden ser el òxid nítric o el diòxid de nitrogen. Per un altre banda els motors de gasolina emeten principalment monòxid de carboni i hidrocarburs.

En conseqüència a aquests agents contaminants habituals durant el disseny de la ventilació és molt important garantir que els passatgers no estiguin exposats a aquests gasos o que ho estiguin en la menor de les mesures possibles. Com s'explica a l'apartat 4.5. d'aquest mateix treball els fabricants instal·len filtres d'aire a l'entrada de la ventilació així com l'opció de reciclatge d'aire per tal d'evitar la introducció d'aire contaminat a dins de la cabina. No obstant aquest reciclatge pot provocar l'acumulació de CO<sub>2</sub> exhalat pels ocupants i per tant alguns fabricants han optat per limitar el temps d'utilització d'aquest mode a 30 minuts mentre que altres han decidit instal·lar sensors de CO<sub>2</sub> els quals quan detecten una acumulació massa alta d'aquest gas activen directament la ventilació externa de la cabina. Per últim un altre efecte que pot provocar aquest reciclatge és l'acumulació de la humitat relativa causant l'entelament dels vidres, per tant una solució és instal·lar sensors d'humitat per tal d'activar la ventilació i evitar aquest entelament.

### Consum energètic

Hi ha molts factors del rendiment del vehicle que tenen efecte en el seu sistema HVAC. La instal·lació de gran varietat de sistemes elèctrics és una cosa comuna especialment en els vehicles d'avui en dia. La necessitat d'alimentar tots aquests sistemes alhora que s'intenta tenir la màxima eficiència de combustible fa que els fabricants hagin de tenir molta cura en el nivell d'eficiència durant la utilització de l'energia elèctrica, especialment en vehicles 100% elèctrics, ja que aquesta energia és molt limitada i de vital importància.

Alguns vehicles monitoritzen i controlen l'ús d'energia reduint aquest consum en moments de mínima disponibilitat. En cotxes elèctrics, on aquesta monitorització és molt important, permet augmentar la seva autonomia i fer alguns quilometres de més sacrificant algunes comoditats proporcionades per elements que consumeixen l'energia de les bateries. Un dels principals sacrificats per aquest sistema sol ser la climatització, ja que és un dels sistemes que més energia consumeix.

El pes dels sistemes de climatització també està controlada pels fabricants, ja que reduir aquest pes permet mantenir una bona eficiència al vehicle i aconseguir unes determinades característiques de conducció.

Una dels avantatges que té un vehicle elèctric enfront d'un convencional, és que habitualment el compressor no està activat per el motor del vehicle, ja que sol utilitzar un motor propi, per tant l'activació del compressor durant la climatització del vehicle no altera el parell motor del vehicle. A més, si el compressor estigues accionat pel motor el sistema HVAC es veuria molt afectat per les condicions de circulació, ja que un motor pot treballar en situacions normals entre 800 i 4000rpm i aquesta diferència de velocitats angulars també afecten al compressor el qual es accionat pel motor.

### **Durabilitat i paràmetres físics**

Podem afirmar que de mitjana un vehicle recorre aproximadament 260.000km durant la seva vida útil, que si ho dividim entre una velocitat mitjana de 65km/h ens dona 4000h de vida. Aquest valor és notablement menor que la majoria de sistemes comercials. No obstant s'han d'evitar que les vibracions, corrosió, petits xocs i altres condicions extremes que puguin afectar al vehicle no provoquin un mal funcionament d'aquest.

Alguns paràmetres físics presents en un vehicle són diferents que els d'un sistema estacionari. Per exemple les vibracions i parell del motor, la proximitat a components que generen ambients perjudicials (per exemple alguns conductes poden tenir petites fuites de fluids corrosius o a altes temperatures) i la durabilitat dels components.

En relació a la resta del vehicle el motor es mou tant cap endavant com endarrere degut a la inèrcia i també en rotació degut al parell. Aquest moviment relatiu respecte del vehicle afecta al compressor si aquest és impulsat directament pel motor.

Degut a que els components d'un vehicle han d'estar preparats per aguantar petits impactes al para-xocs s'han de dissenyar deixant un espai addicional respecte d'altres components i/o les parets i han de complir uns requisits de resistència.

Com s'explicava anteriorment, hi ha components que es poden veure afectats per ambients perjudicials degut a l'exposició a diferents elements com sal de carretera, olis, líquid hidràulic, refrigerant entre d'altres. Per tant s'ha de procurar aïllar correctament els elements que es puguin veure afectats per aquests.

També s'han de controlar les emissions de senyals elèctriques dels components electrònics i assegurar-se e que tots els components funcionen correctament quan hi ha aquest tipus d'emissions. A més aquestes emissions han de ser controlades per tal d'evitar compatibilitat amb freqüències de radio o de comunicació.

El cablejat i els conductes de refrigerant dels sistemes de clima han d'estar protegits del calor del col·lector (només en vehicles amb motor d'explosió) i d'elements afilats.

### **Soroll i vibracions**

Els sistemes de clima no han de produir soroll durant el seu funcionament, només s'accepta una petita emissió acústica quan funciona a màxima potència. S'han de poder mantenir unes condicions de confort amb una velocitat de bufament menor i conseqüentment amb un menor soroll. Les vibracions creades pel compressor, les pulsacions de gas i la vibració del motor del ventilador així com el seu soroll s'han de mantenir ho més petites possibles. Per aconseguir aquesta reducció de soroll habitualment s'utilitzen silenciadors de descarrega i maneguets de goma.

Aquests maneguets són de goma flexible i s'instal·len a les connexions de transmissió de refrigerant per tal d'evitar vibracions degut a moviments relatius d'alguns elements com pot tenir el compressor. Si s'utilitzessin connexions rígides generarien soroll i



s'acabarien trencant degut a les vibracions. Un dels factors més importants a tenir en compte a l'hora d'escollir els maneguets és la permeabilitat del material. Ha de ser prou lenta i predictable per garantir una bona durabilitat. S'ha de considerar que és un factor que depèn de la pressió de treball i la temperatura. Si els maneguets tenen nucli de niló tindran menys permeabilitat i és el material recomanat per al R134a per exemple, però també són una mica més rígids i no esmorteixen tant les vibracions i redueixen menys el soroll.

El soroll induït per les corretges de distribució i la vibració per el parell del motor i del compressor tenen especial importància per als fabricants. Cadascun d'ells té un mètode diferent per calcular-ho. Tot i que és gairebé impossible determinar el soroll total d'un vehicle estudiant els seus components es pot reduir aquest soroll emès reduint la vibració que hi ha als components.

### **Disseny frontal del vehicle**

El disseny de la part davantera del vehicle afecta a l'aire que arriba al condensador. S'ha de dissenyar de forma que l'aire es vegi forçat a creuar el radiador del cotxe i el condensador i per tant s'ha d'evitar que pugui redirigir-se cap a altres zones, ja que l'aire tendeix a moure's cap on hi ha menys resistència i per tant tracta d'evitar el condensador.

L'ideal és que tant el condensador com el radiador del vehicle siguin de la mateixa mida i estiguin un sobre de l'altre, ja que s'elimina la necessitat de segellaments o conductes d'un a l'altre.

Un bon disseny del frontal del cotxe proporciona un rendiment òptim per la refrigeració del motor i per la instal·lació de climatització. S'acostuma a instal·lar una xapa que cobreix els laterals del condensador per tal d'evitar que l'aire pugui desviar-se cap a qualsevol dels costats del condensador i del radiador. La part inferior es cobreix també d'una placa de xapa o de plàstic per tal d'evitar recirculacions internes quan el cotxe està immòbil. Per finalitzar a la part superior s'instal·la un marc que segella el compartiment del condensador quan el capó està tancat per tant conjuntament amb els altres tancaments s'evita que l'aire es redirigeixi cap altres zones.

### **Components del subsistema de control de l'aire**

La cambra de distribució d'aire d'entrada sol ser una part integral de l'estructura del vehicle i s'anomena també plenum. Hi ha dues consideracions de disseny primari, és a dir, en el conjunt del vehicle i algunes més de disseny secundari que són relacionades amb el disseny propi del plenum.

En el cas del primari:

- L'aire que flueix a la cambra no ha d'estar influenciat per les emissions dels sistemes del vehicle, es a dir ha d'arribar-hi aire ho més net possible.



- La cambra s'ha de situar de forma que els efectes aerodinàmics del moviment de l'aire sobre el vehicle incrementi la pressió en ella. Això permet que quan s'activa la ventilació a la cabina l'aire flueixi a través de la unitat de tractament d'aire del vehicle i que l'aire que arriba sigui fresc i net i amb això evitar les infiltracions d'aire de fonts no controlades.

En el secundari:

- S'ha de considerar la pressió a la cambra. Si el flux d'aire té una alta pressió requerirà més energia per al ventilador per tal de proporcionar una ventilació adequada.
- El flux d'aire a l'entrada del bufador ha de ser uniforme. Si el flux d'aire no és uniforme es produeix una pèrdua d'eficiència del ventilador.
- L'entrada de la cambra serveix també per evitar l'entrada d'aigua o de neu.
- L'entrada de la cambra ha d'estar dissenyada de forma que quan el vehicle està completament cobert de neu ha de poder proporcionar l'aire suficient per aclarir el parabrises i proporcionar aire fresc als ocupants.

Normalment l'entrada d'aire de la cambra està situada sota el parabrises i alhora està ben aïllat dels elements sota de capó, per tant es garanteix una bona qualitat d'aire. El dimensionament d'aquestes entrades és vital per al correcte funcionament de la ventilació. Una mida massa petita de les obertures provocaria una pressió més alta i per tant el flux d'aire fresc es reduiria provocant un augment de la possibilitat d'entelament dels vidres i augmentaria el soroll. En canvi una obertura massa gran provocaria una facilitat d'acumulació de neu i un conseqüent bloqueig del flux d'aire.

Per tal de separar les gotes d'aigua que puguin entrar conjuntament amb l'aire es dissenya un canvi de direcció del conducte de l'aire el qual les gotes no poden seguir degut a la seva inèrcia. En conseqüència les gotes xoquen contra la paret i drenen cap a un canal situat a la zona inferior de la cambra. A més aquest canvi de direcció del flux provoca també un augment de la caiguda de pressió de l'aire i un augment del soroll, per tant s'han d'instal·lar deflectors per ajudar a la redirecció del flux i evitar parcialment aquesta caiguda de pressió. Per un altre banda si s'amplia la secció transversal de la cambra de distribució també es poden eliminar les gotes d'aigua però és una solució poc emprada degut a les limitacions d'espai.

Els conductes de distribució han de ser dissenyats amb l'objectiu d'aconseguir la mínima pèrdua de càrrega possible per a proporcionar suficient flux d'aire a diversos punts de sortida. Aquesta distribució idònia es veu compromesa degut al poc espai disponible.

Les sortides d'aire han de ser capaces de dirigir i distribuir el flux d'aire segons les condicions ho requereixin i com els passatgers vulguin. Per tant han de poder ser obertes i tancades així com permetre obertures intermèdies.

Estan dissenyats per garantir el flux d'aire a través del vehicle de davant cap al darrere.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] 2011 ASHRAE HANDBOOK. HVAC Applications
- [2] Directive 2006/40/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 relating to emissions from air conditioning systems in motor vehicles and amending Council Directive 70/156/EEC
- [3] Comprehensive Modeling of Vehicle Air Conditioning Loads Using Heat Balance Method. Mohammad Ali Fayazbakhsh and Majid Bahrami Simon Fraser University
- [4] COMPARATIVE ANALYSIS OF R134a SUBCRITICAL CYCLE VS. CO2 TRANS-CRITICAL CYCLE. NUMERICAL STUDY AND EXPERIMENTAL COMPARISON. J. Rigola, G. Raush, N. Ablanque, C.D. Pérez-Segarra, A. Oliva [2014]
- [5] Cooling Load Calculation and Thermal Modeling for Vehicle by MATLAB OumSaad Abdulsalam , Budi Santoso , Dwi Aries [2015]
- [6] REVISIÓN DEL REFRIGERANTE R1234yf COMO ALTERNATIVA DE BAJO GWP EN REFRIGERACIÓN Y CLIMATIZACIÓN. Adrián Mota-Babiloni, Juan Manuel Mendoza-Miranda, Joaquín Navarro-Esbrí [2012]
- [7] Del Col D., Torresin D., Cavallini A. Heat transfer and pressure drop during condensation of the low GWP refrigerant R1234yf. Int. J. Ref. 33 (2010)
- [8] Zilio C., Brown J.S., Schiochet G., Cavallini A. The refrigerant R1234yf in air conditioning systems. Energy 36 (2011)
- [9] Brown J.S., Zilio C., Cavallini A. Critical Review of the Latest Thermodynamic and Transport Property Data and Models, and Equations of State for R-1234yf. (2010)
- [10] Koban M. HFO-1234yf Low GWP Refrigerant LCCP Analysis. SAE Technical Paper 2009-01-0179, 2009
- [11] Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O. Reference fluid thermodynamic and transport properties (REFPROP), versión 8.0
- [12] Testing of HFO-1234yf and R152a as mobile air conditioning refrigerant replacement M. Bryson C. Dixon S. St Hill January 2011
- [13] Study of Refrigeration System with HFO1234yf as a Working fluid del científic Sad Jarall al 2012
- [14] Termodinamica quinta edicion mcgraw-hill Kenneth wark JR
- [15] Ingenieria térmica principios de termodinàmica tècnica y transferencia de calor Mathieu Legrand ed. Garceta cop. 2014

- [16] 2010 ASHRAE® HANDBOOK REFRIGERATION
- [17] <https://nergiza.com/calefaccion-en-coches-electricos-un-pequeno-problema/>
- [18] <https://medias-norauto.fr/pdf/VEHICULES-HFO-1234YF.pdf>
- [19] [http://www2.dupont.com/Refrigerants/en\\_US/assets/downloads/SmartAutoAC/MAC\\_SAE\\_HFO\\_1234yf](http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/assets/downloads/SmartAutoAC/MAC_SAE_HFO_1234yf)
- [20] [http://www.emersonclimate.com/en-us/Market\\_Solutions/By\\_Solutions/CO2\\_solutions/Documents/Commercial-CO2-Refrigeration-Systems-Guide-to-Subcritical-and-Transcritical-CO2-Applications.pdf](http://www.emersonclimate.com/en-us/Market_Solutions/By_Solutions/CO2_solutions/Documents/Commercial-CO2-Refrigeration-Systems-Guide-to-Subcritical-and-Transcritical-CO2-Applications.pdf)
- [21] <http://www.sae.org/altrefrigerant/presentations/vw.pdf>
- [22] <https://frigoristas.wordpress.com/co2-transcritico/>
- [23] <https://frigoristas.wordpress.com/co2-subcritico/>
- [24] <https://www.indeed.es/salaries/Proyectista-Salaries>
- [25] <http://www.valeocompressors.com/en/TM43>
- [26] <http://corrienteelectrica.renault.es/la-climatizacion-coches-electricos-problema-resuelto/>
- [27] [https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/environment-protection/mobile-air-conditioning-systems\\_es](https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/environment-protection/mobile-air-conditioning-systems_es)
- [28] <http://personales.unican.es/rene/doc/Trasp%20WEB/Trasp%20Tec%20Frig/005%20Refrig%20y%20Salm.pdf>
- [29] <http://www.indubel.com.ar/pdf/gases/refrigerantes.pdf>
- [30] [http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas\\_radiacion\\_solar/atlas\\_de\\_radiacion\\_24042012.pdf](http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar/atlas_de_radiacion_24042012.pdf)
- [31] <https://midcdmz.nrel.gov/solpos/spa.html>
- [32] <http://youfixcars.com>
- [33] <https://www.autorecambiosstore.es/delphi/evaporador-aire-acondicionado-1775314>
- [34] <https://www.autorecambiosstore.es/magneti-marelli/condensador-aire-acondicionado-8038656>
- [35] <https://www.autorecambiosstore.es/aks-dasis/valvula-de-expansion-aire-acondicionado-1731502>

- [36] <http://www.sanden.co.jp/english/topics/2017/0707.html>
- [37] [http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp\\_323.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_323.pdf)
- [38] <https://www.tiempo.com/terrassa-sactual.htm>
- [39] <https://www.bubocar.com>
- [40] <http://www.certificadosenergeticos.com/bomba-de-calor-renovables>
- [40] <http://www.audi.com>
- [41] <http://www.kaori-bphe.com/es/>

## Taules

[42] Taula valors A, B i C. ASHRAE Handbook Applications [5]








Date	A (W m <sup>-2</sup> )	B (W m <sup>-2</sup> )	C (W m <sup>-2</sup> )
21 Jan	1230	0.142	0.058
21 Feb	1215	0.144	0.060
21 Mar	1186	0.156	0.071
21 Apr	1136	0.180	0.097
21 May	1104	0.196	0.121
21 Jun	1088	0.205	0.134
21 Jul	1085	0.207	0.136
21 Aug	1107	0.201	0.122
21 Sep	1152	0.177	0.092
21 Oct	1193	0.160	0.073
21 Nov	1221	0.149	0.063
21 Dec	1234	0.142	0.057

[43] Taula CLTD. Presentació assignatura Climatització i Instrumentació

Temperatura exterior de disseny, °C													
		29		32			35			38		41	43
		B	M	B	M	A	B	M	A	M	A	M	A
OMD a Parets i portes													
	Nord	4	2	7	4	2	10	7	4	10	7	10	13
	NE i NO	8	5	11	8	5	13	11	8	13	11	13	16
	Est i Oest	10	7	13	10	7	16	13	10	16	13	16	18
	SE i SO	9	6	12	9	6	14	12	9	14	12	14	17
	Sud	6	3	9	6	3	12	9	6	12	9	12	14
Sostre: En contacte amb exterior		23	21	26	23	21	28	26	23	28	26	28	31
Sòls i sostres: En contacte amb interior i envans interiors		5	2	7	5	2	8	7	5	8	7	8	11

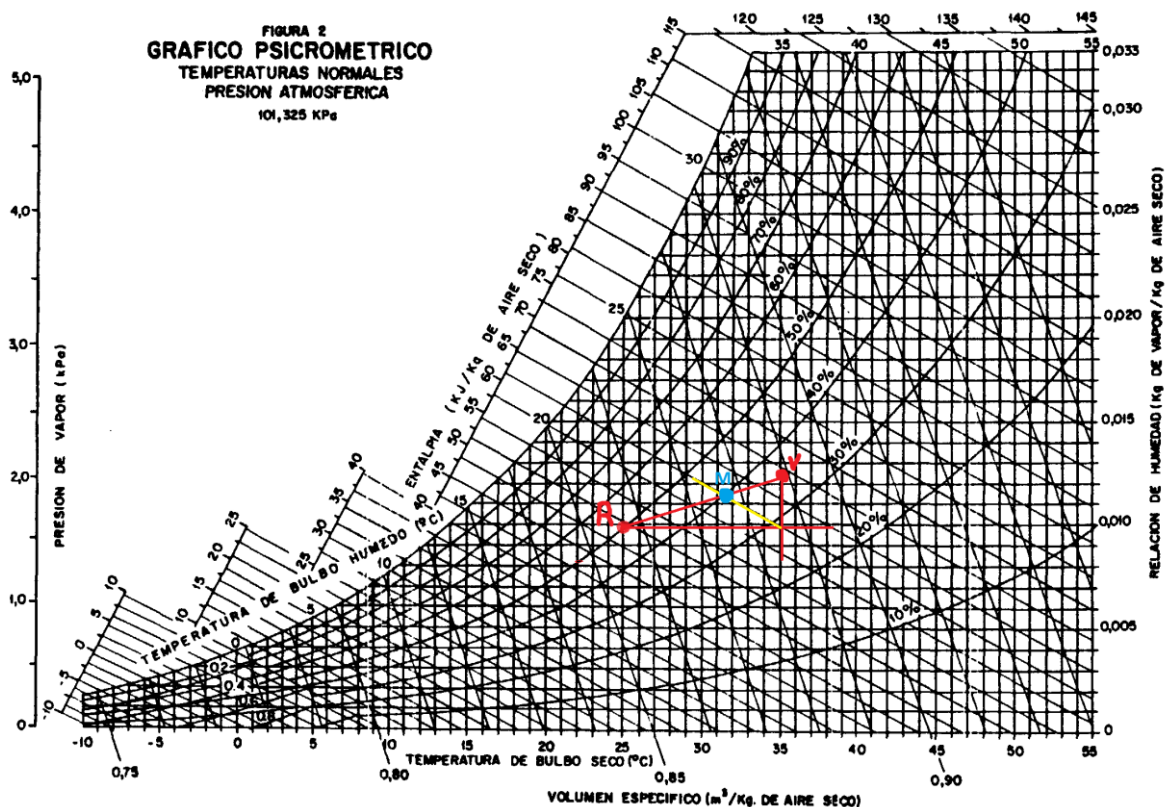
**B** denota una oscil·lació diürna baixa, menys de 9 °C; **M** denota una oscil·lació diürna mitja, entre 9 i 14 °C; **A** denota una oscil·lació diürna alta, més de 14 °C.

[44] Taula Bescanviadors. Series de bescanviadors marca Kaori

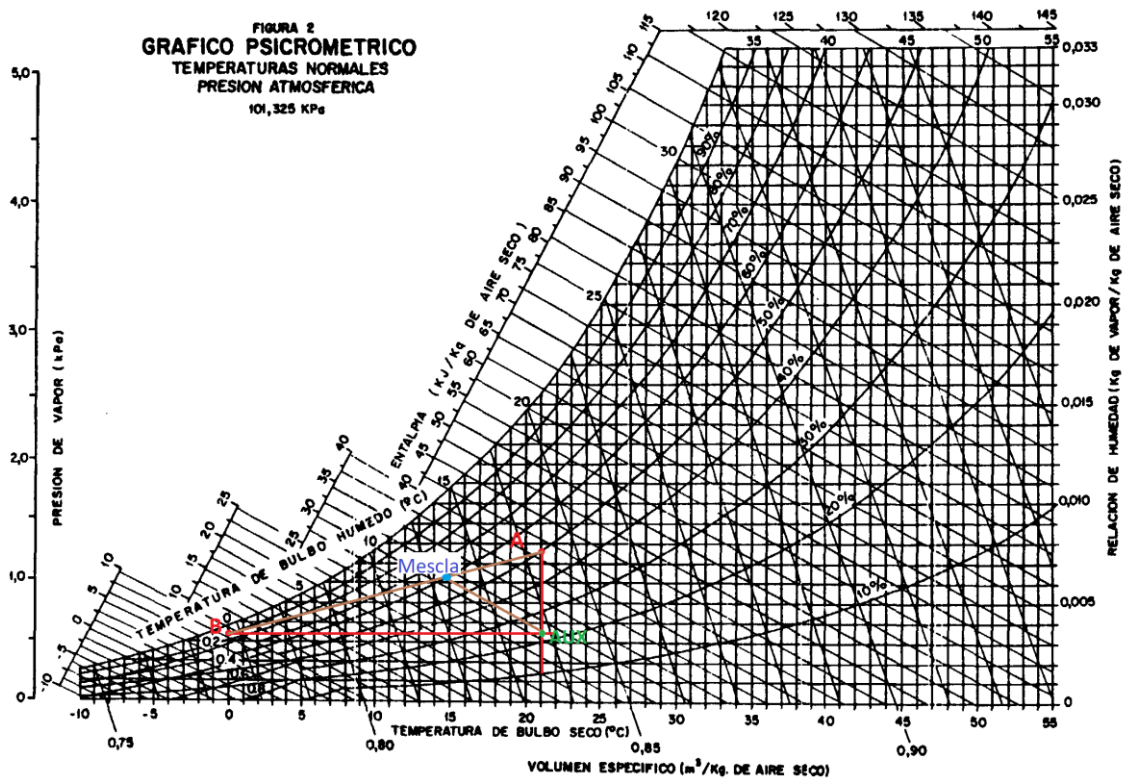
Series	Serie K	Serie R	Serie D	Serie Z	Serie C	Serie A	Series E/F
	Estàndar	Alto rendimiento de transferencia de calor	Pared doble	Flujo diagonal grande	Alta presión	Secador	Calderas
<b>Soluciones</b>							
Máx. Presión de trabajo	30/ 45bar	45bar	30bar	45bar	140bar	16bar	20bar
Característica	Circuitos Dual Estándar	R410A	Prevenir la contaminación por líquidos	Alto caudal de gran capacidad de calor	R744(CO <sub>2</sub> )	Evaporador, separador y preenfriador en uno	Baja presión
Material de soldadura	Níquel / Cobre	Cobre	Cobre	Cobre	Cobre	Cobre	Cobre
<b>Aplicaciones</b>	HVAC	●	●	●	●		
	Refrigeración	●	●	●	●		
	Bomba de calor	●	●	●	●		
	Enfriador	●	●		●		
	Calefacción y refrigeración de distrito	●	●		●		
	Calefacción solar	●	●		●		
	Piscina						
	Secador					●	
	Refrigeración de proceso	●		●	●		●
	Recuperación de calor	●			●		
	Controlador de temperatura	●					●
	Máquina de corte y soldadura por láser	●					
	Refrigeración hidráulico	●			●		
	Industria energética	●			●		
	ORC	●			●		
	Célula de combustible, CHP	●					●
	Caja de engranajes de energía eólica	●			●		
	Marina y transporte	●			●		
<b>Soluciones</b>	Evaporador	●	●		●		
	Condensador	●	●	●	●		
	Desescalentador/subenfriador	●	●	●	●		
	Economizador	●	●	●	●		
	Refrigeración de aceite	●		●			
	Pre-enfriador/precalentador	●	●	●	●		



[45] Diagrama psicomètric per al cas d'estiu



[46] Diagrama psicomètric per al cas d'hivern



- [47] [https://www.chemours.com/Refrigerants/en\\_US/assets/downloads/k24239\\_Opteon\\_yf\\_thermo\\_properties\\_SI.pdf](https://www.chemours.com/Refrigerants/en_US/assets/downloads/k24239_Opteon_yf_thermo_properties_SI.pdf)
- [48] <http://www.gazechim-froid.fr/site/wp-content/uploads/2014/12/Table-Thermodynamique-R1234yf.pdf>
- [49] [http://www.emersonclimate.com/europe/ProductDocuments/AlcoLiterature/ES\\_GPC-2016.pdf](http://www.emersonclimate.com/europe/ProductDocuments/AlcoLiterature/ES_GPC-2016.pdf)
- [50] [https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property\\_tables/CO2/C02\\_Transcrit1.html](https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property_tables/CO2/C02_Transcrit1.html)
- [51] <https://medias-norauto.fr/pdf/VEHICULES-HFO-1234YF.pdf>